



Universidad Carlos III de Madrid
Escuela Politécnica Superior

**Ingeniería Técnica de Telecomunicación: Sistemas de
Telecomunicación**

Proyecto Fin de Carrera

**Aplicación de los planos de masa artificiales al diseño de un
dipolo de bajo perfil impreso con balun**

Autor: Raúl Viedma Astudillo

Tutora: Eva Rajo Iglesias

30 de Noviembre de 2012

Resumen

Las superficies AMC presentan comportamientos únicos que les permiten ser ideales para múltiples aplicaciones, entre ellas para el diseño de antenas de bajo perfil, que abordaremos aquí. Uno de los comportamientos más destacables es, que pueden comportarse como conductores magnéticos perfectos, es decir, que las corrientes imágenes paralelas estén en fase con la corriente original, impidiendo que se anulen y permitiendo una radiación eficiente. Otra de las características es que tienen una banda de frecuencia en la cual las ondas de superficie no se propagan, lo cual resulta interesante ya que elimina interferencias en los diagramas de radiación y hace que estos sean por lo general más suaves.

El objetivo de este proyecto es profundizar en diferentes variantes de una metalización en forma de anillo para lograr el diseño de una estructura de doble banda, aplicada sobre antenas de bajo perfil. En nuestro caso la antena a estudiar será un dipolo, que debido a sus características debemos alimentar con un balun, que también se estudiara también en este proyecto.

Índice General

Capítulo 1. Introducción.	1
1.1. Motivación del proyecto.	1
1.2. Objetivos.	2
Capítulo 2. Estudio del balun y antena dipolo	4
2.1. Introducción	4
2.2. Estudio del dipolo impreso	6
2.2.1 Cálculo del tamaño de brazo del dipolo	6
2.2.2 Cálculo del ancho de los brazos del dipolo.	8
2.2.3 Cálculo del gap	8
2.3 Estudio del balun.	9
2.3.1 Cálculo de las longitudes d_1 y d_2	11
2.3.2 Cálculo del tamaño de a_2 (anchura brazo balun)	13
2.3.3 Barrido paramétrico permitividad sustrato.	15
2.4 Caracterización del conjunto balun-dipolo.	16
2.4.1 Nivel de adaptación.	17
Capítulo 3. Estructuras AMC	19
3.1 Introducción a las estructuras AMC.	19
3.2 Estructuras con metalización en anillo.	19
3.2.1 Barrido paramétrico permitividad (ϵ_r)	21
3.2.2 Barrido paramétrico altura sustrato (h)	22
3.2.3 Barrido paramétrico del periodo (w)	22
3.2.4 Barrido paramétrico con radio exterior fijo.	23
3.2.5 Barrido paramétrico con radio exterior e interior variables.	25
3.3 Estructura con metalización de dos anillos.	26
3.3.1 Variación grosor anillo interior.	27
3.3.2 Variación permitividad relativa del sustrato.	28
3.3.3 Conclusiones.	29
3.4 Estructuras con metalización de anillos superpuestos.	29
3.4.1 Variación ancho anillo arriba.	30
3.4.2 Variación permitividad relativa del sustrato.	31
Capítulo 4. Conjunto estructuras AMC y dipolo.	33
4.1 Introducción.	33
4.2 Caracterización del conjunto dipolo-plano de masa con metalización de anillo simple.	34
4.2.1 Cálculo del tamaño y altura del dipolo.	35
4.2.2 Nivel de adaptación.	40
4.2.3 Diagrama de radiación.	41
4.2.4 Distribución campo eléctrico.	43
4.3 Caracterización del conjunto dipolo-plano de masa con metalización de dos anillos concéntricos.	43
4.3.1 Cálculo del tamaño y altura del dipolo.	45
4.3.2 Nivel de adaptación.	48
4.3.3 Diagrama de radiación.	49
4.3.4 Distribución campo eléctrico.	51
4.4 Caracterización del conjunto dipolo-plano de masa con metalización de anillos superpuestos en distintos sustratos.	52
4.4.1 Cálculo del tamaño y altura del dipolo.	54

4.4.2 Nivel de adaptación.....	57
4.4.3 Diagrama de radiación.....	58
4.4.4 Distribución campo eléctrico.....	61
4.5 Reducción del tamaño del plano de masa.....	62
4.5.1 Anillo simple.....	62
4.5.1.1 Nivel de adaptación.....	63
4.5.1.2 Diagrama de radiación.....	63
4.5.2 Dos anillos concreticos.....	64
4.5.2.1 Nivel de adaptación.....	65
4.5.2.2 Diagrama de radiación.....	65
4.5.3 Anillos superpuestos en diferentes sustratos.....	67
4.5.3.1 Nivel de adaptación.....	68
4.5.3.2 Diagrama de radiación.....	69
4.5.4 Conclusión.....	71
Capítulo 5. Resultados experimentales.....	71
5.1 Introducción.....	71
5.2 Implementación de los diseños.....	71
5.2.1 Materiales y tecnología de fabricación.....	71
5.2.2 Dimensiones y especificaciones de los modelos a implementar.....	72
5.2.2.1 Dipolo alimentado con balun sobre plano de masa artificial con metalización de anillos simples.....	72
5.2.2.2 Dipolo alimentado con balun sobre plano de masa artificial con metalización de dos anillos concéntricos.....	77
5.3 Medidas de laboratorio.....	82
5.3.1 Medidas del dipolo con balun en vacío y sobre plano metálico.....	83
5.3.2 Medidas del dipolo con balun sobre plano con metalización de anillos simples.....	85
5.3.3 Medidas del dipolo con balun sobre plano con metalización de anillos concéntricos...	87
Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras.....	89
6.1 Conclusiones.....	89
6.2 Posibles líneas futuras.....	90
Bibliografía.....	91

Índice de Figuras

Figura 2.1: Esquema de alimentación de dipolo mediante cable coaxial.....	4
Figura 2.2: Alimentación antena Yagi-uda mediante balun.....	5
Figura 2.3: Esquema de dipolo impreso sobre sustrato.....	6
Figura 2.4: S_{11} (dB) para distintas longitudes de l	7
Figura 2.5: Diagrama de radiación 3D y coordenadas polares del dipolo.....	7
Figura 2.6: S_{11} (dB) para distintos anchos del brazo del dipolo.....	8
Figura 2.7: S_{11} (dB) para distintos anchos de gap.....	9
Figura 2.8: Esquema del balun.....	10
Figura 2.9: S_{11} (dB) para distintas longitudes de d_1 y d_2 en el balun.....	11
Figura 2.10: S_{12} (dB) para distintas longitudes de d_1 y d_2 en el balun.....	12
Figura 2.11: S_{13} (dB) para distintas longitudes de d_1 y d_2 en el balun.....	12
Figura 2.12: Comparativa de la fase de S_{12} y S_{13} para $d_1=12\text{mm}$ y $d_2=38.5\text{mm}$	13
Figura 2.13: S_{11} (dB) para distintos valores de a_2 (anchura brazo dipolo).....	13
Figura 2.14: S_{12} (dB) para distintos valores de a_2 (anchura brazo dipolo).....	14
Figura 2.15: S_{13} (dB) para distintos valores de a_2 (anchura brazo dipolo).....	14
Figura 2.16: Comparativa de la fase de S_{12} y S_{13} para $a_2=2.4\text{mm}$	15
Figura 2.17: Esquema línea de transmisión microstrip.....	15
Figura 2.18: S_{11} (dB) para distintos valores de la permitividad ϵ_r	16
Figura 2.19: Esquema del conjunto balun y dipolo.....	17
Figura 2.20: Esquema tecnología microstrip.....	17
Figura 2.21: Nivel de adaptación del conjunto balun y dipolo.....	18
Figura 3.1: Esquema celda con metalización en anillo.....	20
Figura 3.2: Fase de la onda reflejada para los valores iniciales.....	20
Figura 3.3: Fase de la onda reflejada para distintos valores de la permitividad.....	21
Figura 3.4: Fase de la onda reflejada para distintos valores de la altura del sustrato.....	22
Figura 3.5: Fase de la onda reflejada para distintos valores del ancho de la celda unidad.....	23
Figura 3.6: Fase de la onda reflejada para distintos valores del ancho del anillo.....	24
Figura 3.7: Fase de la onda reflejada para valores específicos del ancho del anillo.....	24
Figura 3.8: Fase de la onda reflejada para distintos valores del radio exterior del anillo.....	25
Figura 3.9: Imagen de la celda unidad con dos anillos concéntricos.....	26
Figura 3.10: Fase de la onda reflejada para los valores por defecto.....	27
Figura 3.11: Fase de la onda reflejada para distintos valores del ancho del anillo.....	27
Figura 3.12: Fase de la onda reflejada para distintos valores de permitividad del sustrato.....	28
Figura 3.13: Imagen de la celda unidad con dos anillos en diferentes sustratos superpuestos.....	29
Figura 3.14: Fase de la onda reflejada para los valores por defecto.....	30
Figura 3.15: Fase de la onda reflejada para distintos valores del ancho del anillo de arriba.....	30
Figura 3.16: Fase de la onda reflejada para distintos valores de permitividad del sustrato.....	31
Figura 4.1: Esquema representativo de la teoría de las imágenes para el dipolo.....	33
Figura 4.2: Imagen de la corriente emitida por una antena en diferentes posiciones respecto al plano.....	34
Figura 4.3: Conjunto dipolo-plano de masa con metalización de anillo simple.....	34
Figura 4.4: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 5mm.....	36
Figura 4.5: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 6mm.....	36
Figura 4.6: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 7mm.....	36
Figura 4.7: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 8mm.....	37
Figura 4.8: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 9mm.....	37
Figura 4.9: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 10mm.....	37
Figura 4.10: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 11mm.....	38
Figura 4.11: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 12mm.....	38
Figura 4.12: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 13mm.....	38
Figura 4.13: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 14mm.....	39
Figura 4.14: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 15mm.....	39
Figura 4.15: Nivel de adaptación para diferentes alturas para una longitud fija del dipolo de $l=27\text{mm}$	40
Figura 4.16: Nivel de adaptación del dipolo de tamaño 0.36λ colocado a 13mm sobre el plano de masa con metalización en anillo.....	41
Figura 4.17: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.36λ colocado a 13 mm sobre el plano de masa con metalización en anillo.....	42
Figura 4.18: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.36λ colocado a 13 mm sobre el plano de masa con metalización en anillo.....	42
Figura 4.19: Diagrama de campo E generado por un dipolo de tamaño 0.36λ colocado a 13 mm sobre el plano de masa con metalización en anillo.....	43
Figura 4.20: Conjunto dipolo-plano de masa con metalización de 2 anillos concéntricos.....	44
Figura 4.21: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 10mm.....	45

Figura 4.22: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 11mm.....	45
Figura 4.23: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 12mm.....	46
Figura 4.24: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 13mm.....	46
Figura 4.25: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 14mm.....	46
Figura 4.26: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 15mm.....	47
Figura 4.27: Nivel de adaptación para diferentes alturas para una longitud fija del dipolo de $l=24\text{mm}$	47
Figura 4.28: Nivel de adaptación del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14mm sobre el plano de masa con metalización en anillo.....	48
Figura 4.29: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos para una frecuencia de 2.70 GHz.....	49
Figura 4.30: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 1 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos.....	50
Figura 4.31: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos para una frecuencia de 2.84 GHz.....	50
Figura 4.32: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos.....	51
Figura 4.33: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos.....	51
Figura 4.34: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos.....	52
Figura 4.35: Conjunto dipolo-plano de masa con metalización de anillos superpuestos.....	53
Figura 4.36: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 10mm.....	54
Figura 4.37: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 11mm.....	54
Figura 4.38: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 12mm.....	55
Figura 4.39: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 13mm.....	55
Figura 4.40: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 14mm.....	55
Figura 4.41: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 15mm.....	56
Figura 4.42: Nivel de adaptación para diferentes alturas para una longitud fija del dipolo de $l=23\text{mm}$	56
Figura 4.43: Nivel de adaptación del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15mm sobre el plano de masa con metalización en anillos superpuestos.....	57
Figura 4.44: Nivel de adaptación del dipolo para las tres metalizaciones estudiadas.....	58
Figura 4.45: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.66 GHz.....	59
Figura 4.46: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.66 GHz.....	59
Figura 4.47: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.83 GHz.....	60
Figura 4.48: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.83 GHz.....	60
Figura 4.49: Distribución de campo eléctrico del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos.....	61
Figura 4.50: Distribución de campo eléctrico del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos.....	61
Figura 4.51: Conjunto dipolo-plano de masa 3×3 con metalización de anillo simple.....	62
Figura 4.52: Comparación del nivel de adaptación del dipolo de tamaño 0.36λ colocado a 13mm sobre diferentes planos con metalización de anillo simple.....	63
Figura 4.53: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.36λ colocado a 13 mm sobre el plano de masa 3×3 con metalización de anillo simple para una frecuencia de 2.33 GHz.....	63
Figura 4.54: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.36λ colocado a 13 mm sobre el plano de masa 3×3 con metalización de un anillo simple para una frecuencia de 2.33GHz.....	64
Figura 4.55: Conjunto dipolo-plano de masa 3×3 con metalización de dos anillos concéntricos.....	64
Figura 4.56: Comparación del nivel de adaptación del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14mm sobre diferentes planos con metalización de dos anillos concéntricos.....	65
Figura 4.57: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa 3×3 con metalización de dos anillos concéntricos para una frecuencia de 2.7 GHz.....	65
Figura 4.58: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa 3×3 con metalización de dos anillos concéntricos para una frecuencia de 2.7 GHz.....	66
Figura 4.59: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa 3×3 con metalización de dos anillos concéntricos para una frecuencia de 2.81 GHz.....	66
Figura 4.60: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa 3×3 con metalización de dos anillos concéntricos para una frecuencia de 2.81 GHz.....	67
Figura 4.61: Conjunto dipolo-plano de masa 3×3 con metalización de anillos superpuestos en diferentes sustratos.....	68

Figura 4.62: Comparación del nivel de adaptación del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos.....	68
Figura 4.63: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.66GHz.....	69
Figura 4.64: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.66 GHz.....	69
Figura 4.65: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.83GHz.....	70
Figura 4.66: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.81 GHz.....	70
Figura 5.1: Esquema dipolo alimentado con balun sobre plano de masa artificial con metalización en anillo.....	73
Figura 5.2: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 2mm.....	74
Figura 5.3: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 4mm.....	74
Figura 5.4: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 5mm.....	74
Figura 5.5: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 7mm.....	75
Figura 5.6: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 9mm.....	75
Figura 5.7: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 11mm.....	75
Figura 5.8: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 13mm.....	77
Figura 5.9: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 15mm.....	77
Figura 5.10: Esquema dipolo alimentado con balun sobre plano de masa artificial con metalización en anillo.....	78
Figura 5.11: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 2mm.....	79
Figura 5.12: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 3mm.....	79
Figura 5.13: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 4mm.....	79
Figura 5.14: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 5mm.....	80
Figura 5.15: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 6mm.....	80
Figura 5.16: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 7mm.....	80
Figura 5.17: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 8mm.....	81
Figura 5.18: Imagen del analizador vectorial de redes utilizado para las mediciones	83
Figura 5.19: Imagen del dipolo y el balun	83
Figura 5.20: Medida del nivel de adaptación $S_{11}(\text{dB})$ del dipolo en vacío	84
Figura 5.21: Medida del nivel de adaptación $S_{11}(\text{dB})$ del dipolo sobre plano metálico	84
Figura 5.22: Medida del dipolo sobre plano metálico	85
Figura 5.23: Plano con metalización de anillos simples	86
Figura 5.24: Nivel de adaptación $S_{11}(\text{dB})$ para diferentes alturas sobre plano con metalización de anillos simples.....	81
Figura 5.25: Plano con metalización de dos anillos concéntricos	81
Figura 5.26: Nivel de adaptación $S_{11}(\text{dB})$ para diferentes alturas sobre plano con metalización de dos anillos concéntricos	84

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Valores iniciales dipolo.....	6
Tabla 2.2: Valores del balun.....	10
Tabla 3.1: Valores iniciales de la estructura con metalización en anillo.....	20
Tabla 3.2: Frecuencia de la fase reflejada nula y ancho de banda para distintos valores de permitividad.....	21
Tabla 3.3: Frecuencia de la fase reflejada nula y ancho de banda para distintos valores de la altura del sustrato.....	22
Tabla 3.4: Frecuencia de la fase reflejada nula y ancho de banda para distintos valores de la longitud del periodo.....	23
Tabla 3.5: Frecuencia de la fase reflejada nula y ancho de banda para distintos valores del ancho del anillo.....	24
Tabla 3.6: Frecuencia de la fase reflejada nula y ancho de banda para otros valores del ancho del anillo.....	25
Tabla 3.7: Frecuencia de la fase reflejada nula y ancho de banda para distintos valores del radio exterior del anillo.....	25
Tabla 3.8: Valores iniciales de la estructura con metalización de dos anillos concéntricos.....	26
Tabla 3.9: Frecuencia de resonancia magnética dependiente del anillo interior para distintos valores del ancho del anillo	28
Tabla 3.10: Frecuencia de resonancia magnética dependientes del anillo interior y exterior para distintos valores de la permitividad relativa del sustrato.....	28
Tabla 3.11: Valores iniciales de la estructura con metalización de dos anillos sobre sustratos diferentes y superpuestos.....	29
Tabla 3.12: Frecuencia de resonancia magnética dependiente del anillo interior para distintos valores del ancho del anillo de arriba.....	31
Tabla 3.13: Frecuencia de resonancia magnética dependientes del anillo superior e inferior para distintos valores de la permitividad relativa del sustrato.....	31
Tabla 4.1: Conjunto dipolo-plano de masa con metalización en anillo.....	35
Tabla 4.2: Nivel de adaptación y frecuencia de resonancia para diferentes alturas para una longitud fija del dipolo de $l=27\text{mm}$	40
Tabla 4.3: Conjunto dipolo-plano de masa con metalización de dos anillos concéntricos.....	44
Tabla 4.4: Nivel de adaptación y frecuencia de resonancia para diferentes alturas para una longitud fija del dipolo de $l=24\text{mm}$	48
Tabla 4.5: Conjunto dipolo-plano de masa con metalización de anillos superpuestos.....	53
Tabla 4.6: Nivel de adaptación y frecuencia de resonancia para diferentes alturas para una longitud fija del dipolo de $l=23\text{mm}$	56
Tabla 4.7: Comparación entre los niveles de adaptación y anchos de banda de las tres metalizaciones estudiadas.....	58
Tabla 5.1: Valores esquema dipolo alimentado con balun sobre plano de masa artificial con metalización en anillo.....	78
Tabla 5.2: Valores esquema dipolo alimentado con balun sobre plano de masa artificial con metalización de dos anillos concéntricos.....	82

Capítulo 1.

Introducción

1.1. Motivación del proyecto

La implantación de las tecnologías de la información y las comunicaciones en nuestras vidas está planteando nuevos retos de diseño con el fin de poder ofrecer mayor funcionalidad y más calidad en menos espacio. El área de antenas y microondas ha experimentado un avance significativo en los últimos años gracias al estudio de estructuras periódicas conocidas como metamateriales, y se augura que van a suponer una revolución en la mejora del funcionamiento de antenas y dispositivos de microondas.

Los metamateriales poseen unas propiedades electromagnéticas especiales que no se encuentran en la realidad, de ahí que se conozcan también como superficies artificiales. En concreto, las estructuras EBG (electromagnetic bandgap) proporcionan bandas de frecuencia dentro de las cuales las ondas no se propagan, y bajo ciertas condiciones estas superficies funcionan como conductores magnéticos artificiales. La tendencia actual en el diseño de sistemas de comunicaciones es la de hacer terminales cada vez de dimensiones menores. Esto implica a su vez el diseño de antenas cada vez más pequeñas que puedan integrarse en estos terminales. Para ello el estudio de estructuras de metamateriales está consiguiendo el diseño de antenas de bajo perfil. Para realizar estas antenas de bajo perfil hay que emplear planos de masa artificiales con superficies de alta impedancia.

Este tipo de planos de masa, se utilizan habitualmente para aplicaciones de banda estrecha, pero es posible conseguir aumentar el ancho de banda sin apenas coste, si conseguimos planos de doble-banda con frecuencias muy cercanas.

1.2. Objetivos

En anteriores proyectos [1] se demostraba la utilización de las superficies AMC a la hora de conseguir antenas de bajo perfil trabajando a una frecuencia determinada. El objetivo principal de este proyecto es demostrar la capacidad de distintos tipos de superficies AMC completamente planos de funcionar en dos bandas de frecuencia distintas [2][3][4][5] para, posteriormente, ser utilizadas para el diseño de antenas de hilo de bajo perfil, utilizando como antena un dipolo impreso.

Para ello, estudiaremos tres ejemplos de superficies AMC, con las que veremos las frecuencias en las que trabaja y su posterior influencia en la adaptación de nuestro dipolo. Estas estructuras están compuestas por metalizaciones impresas sobre un sustrato dieléctrico. En nuestro caso estudiaremos tres metalizaciones distintas en forma de anillo, variando el número de estos con el objetivo de conseguir doble banda de frecuencia. Este tipo de metalización tiene la ventaja, frente a otros, de la ausencia de vías que atraviesan el sustrato y conectan la metalización con el plano de masa metálico, lo que conllevaría un aumento considerable de la dificultad y precio de construcción.

El hecho de trabajar con un dipolo y alimentarlo a través de un cable coaxial, hace que la línea de transmisión este desbalanceada, lo cual implica una pérdida de potencia de la señal importante. Por ello en este proyecto diseñaremos un balun, también impreso, entre la alimentación y el dipolo para así evitar que a una determinada frecuencia, en nuestro caso trabajaremos en 2 GHz, haya corrientes que retornen por la malla y así evitar pérdidas de potencia.

Se ha dividido este proyecto en 5 capítulos, incluyendo este primero. El desglose de cada uno por separado es el siguiente:

En el segundo capítulo abordaremos primeramente el diseño del balun. Basándonos en las dimensiones de diseños en estudios anteriores [6][7], adaptaremos el balun para conseguir que trabaje en la banda de frecuencia que nos interesa, en torno a los 2 GHz, y conseguir un desfase cercano a los 180° , para así conseguir que se anule la mayor parte de la corriente que regresa por la malla. Finalmente veremos cómo influye en la frecuencia de trabajo del dipolo una vez que simulemos conjuntamente el balun y el dipolo.

En el tercer capítulo, comenzaremos a analizar el plano de masa. Se diseñaran tres planos de masa artificiales cada uno de ellos con una metalización distinta. El primero de ellos constara de un anillo, y los otros dos serán celdas de dos anillos, estando uno de ellos ambos anillos en el mismo sustrato y colocados de forma concéntrica, y en el otro estarán sobre diferente sustrato uno encima del otro, es decir, con una estructura multicapa. Una de las características de este tipo de planos [8], es que cuando sobre ellos incide una onda plana, la fase de la onda reflejada es 0° , por tanto en este capítulo analizaremos una celda de cada tipo de metalización, adaptando las dimensiones para que la fase de la onda reflejada en la superficie (como un conductor magnético) sea 0° en la frecuencia de 2GHz.

Una vez conocidas las características de una celda con cada tipo de metalización, en el cuarto capítulo formaremos el plano de masa artificial completo y veremos cómo afecta a la radiación de la antena, simulando para varias longitudes del dipolo y varias distancias respecto del plano de la misma. Estas primeras simulaciones, las realizaremos sin el balun, y con un tamaño estándar del plano, el cual reduciremos en vistas a encontrar el tamaño más pequeño posible del conjunto que nos de los mejores resultados. Además también se tratara de encontrar la menor altura posible para colocar el dipolo.

En el quinto y último capítulo, correspondiente a los resultados experimentales, tendremos como objetivo el diseño final de la antena especificando cada uno de los materiales a usar y dimensiones finales, para su posterior fabricación, comparando una vez realizadas las mediciones pertinentes, los resultados simulados con los de la antena real. Para finalizar incluiremos las conclusiones del proyecto así como las líneas futuras a seguir.

Capítulo 2.

Estudio del balun y dipolo impreso

2.1. Introducción

En este primer capítulo nuestro objetivo principal es comprender el funcionamiento y características de la antena, y del balun que utilizaremos para alimentar la misma y que detallaremos más adelante. Nos basaremos como en la gran parte del proyecto en la observación de los parámetros “s”, tanto en fase como en módulo. Para un correcto estudio del comportamiento de dichos parámetros, es necesario realizar una serie de barridos paramétricos sobre las diferentes longitudes que caracterizan, en este caso, el dipolo, tales como la longitud y anchura de los brazos, permitividad del sustrato, etc. A partir de estos datos se procederá a realizar a su análisis, comprobando para qué longitudes la antena tiene una mejor adaptación a la frecuencia a la que queremos trabajar.

Las simulaciones para ver el comportamiento tanto del dipolo como del resto de estructuras a analizar en el proyecto, se van a realizar en su totalidad utilizando el software comercial CST Microwave Studio 2010.

La antena con la que vamos a trabajar es un dipolo, un tipo de antena balanceada en la cual la corriente que fluye en una de los brazos es igual o equivalente en el otro, pero opuestas en fase. Ahora cuando alimentamos una antena dipolo al centro con cable coaxial, estamos desadaptando el balance del sistema. Esto sucede porque un lado de la antena la conectamos al conductor central o interior del coaxial y el otro lo conectamos a la malla. Normalmente la malla protectora está conectada a tierra en el transmisor, haciéndola una línea no balanceada.

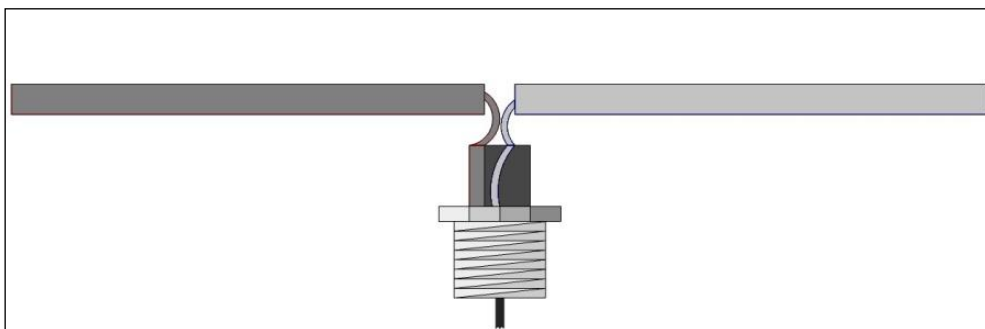


Figura 2.1: Esquema de alimentación de dipolo mediante cable coaxial

Es esta condición de no balanceada la que puede hacer que alguna corriente regresase por la malla del coaxial desde la antena, pudiendo producir una pérdida de potencia en la transmisión. Por lo que para evitar este tipo de problemas, usaremos un balun para adaptar la línea de alimentación de coaxial desbalanceado (unbalanced) a la antena balanceada (balanced).

Las alimentaciones no balanceadas para antenas simétricas, como puede ser el caso de un dipolo, provocan problemas de deformación del diagrama de radiación, pérdida de pureza de polarización o modificaciones en la impedancia ideal de la antena, lo cual reduce el ancho de banda final del sistema.

Se denomina balun (balanced to unbalanced) a un dispositivo adaptador de impedancias que convierte líneas de transmisión simétricas en asimétricas, y viceversa, ya que se trata de un dispositivo reversible.

Por lo tanto, a la hora de diseñar nuestro balun, deberemos conseguir un desfase de 180° entre las líneas del balun, para cancelar la corriente que retorna por la malla a una determinada frecuencia (en nuestro caso trabajaremos con 2GHz).

Hemos tomado, para el diseño de nuestro balun como referencia el modelo esquemático [1] sobre la alimentación de una antena Yagi-Uda mediante un balun, adaptándola a nuestro modelo con un dipolo.

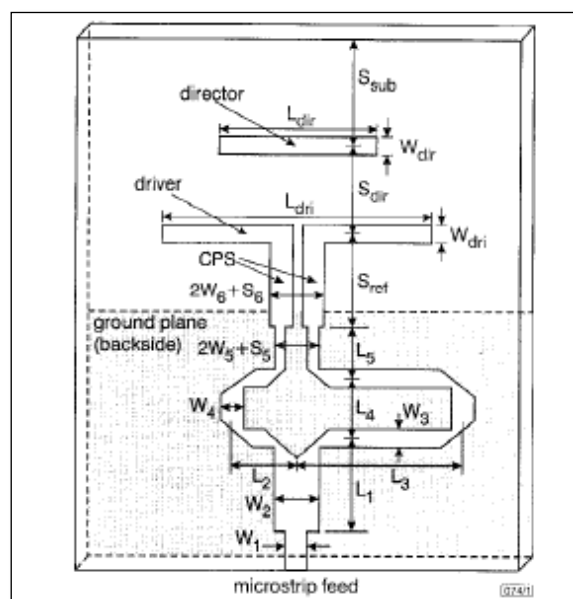


Figura 2.2: Alimentación antena Yagi-uda mediante balun

2.2. Estudio del dipolo impreso

Antes de comenzar con el diseño del balun debemos realizar un pequeño estudio del correcto funcionamiento del dipolo impreso sobre un sustrato. De dichas antenas se analizará el nivel de adaptación y el diagrama de radiación. Hemos utilizado por conveniencia un sustrato de permitividad 2.2, el cual usaremos durante todo el proyecto, aunque analizaremos también cómo afecta su variación. Para ver que longitudes son las más adecuadas para maximizar el nivel de adaptación del dipolo a 2GHz variaremos alguno de los parámetros manteniendo el resto fijos, comprobando cómo afectan en la radiación de la antenna. En la siguiente figura podemos ver el dipolo sobre el sustrato además de la denominación que le hemos puesto a cada una de las características del dipolo o del plano para así poderlas nombrar sin confusiones a lo largo del estudio.

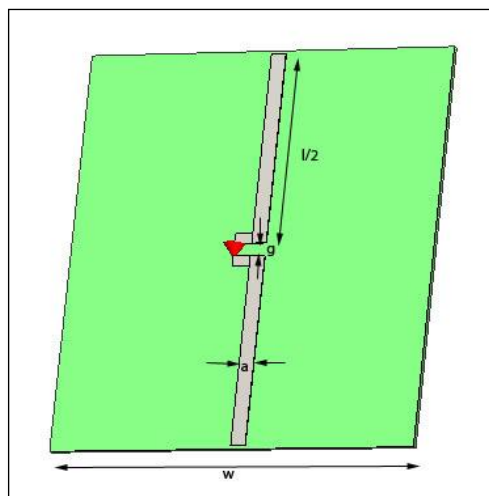


Figura 2.3: Esquema de dipolo impreso sobre sustrato

Inicialmente utilizaremos los siguientes valores por defecto para el diseño del dipolo:

Características dipolo		
Referencia	Descripción	Tamaño(mm)
a	grosor brazo dipolo	2
w	longitud celda	51
l	longitud de un brazo del dipolo	25
g	separación entre los brazos	2
h	altura sustrato	0.78
ϵ_r	permitividad relativa sustrato	2.2

Tabla 1.1: Valores iniciales dipolo

2.2.1. Cálculo del tamaño del brazo del dipolo

En este primer estudio vamos a estudiar la influencia que tiene el tamaño del brazo entero del dipolo, que hemos nombrado como "l" en la Figura 2.3, en el nivel de adaptación. Para ello mantenemos fijos el resto de parámetros variando el valor éste en unos valores entre 60 y 90 milímetros. Escogimos estas longitudes porque consideramos que eran las más lógicas para el diseño del dipolo. En términos de longitudes de onda comprenden entre 0.4λ y 0.6λ .

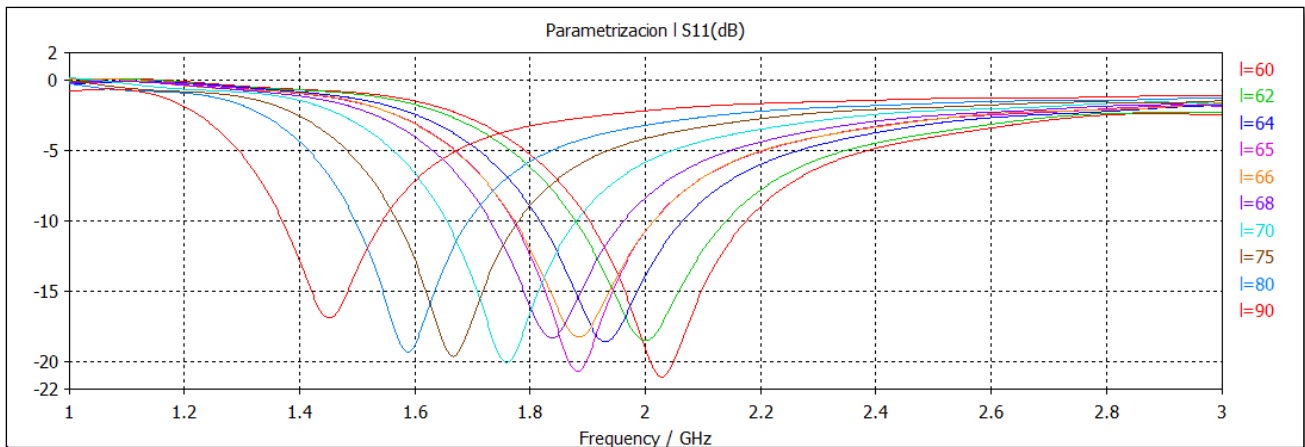


Figura 2.4: S_{11} (dB) para distintas longitudes de l

Como se puede observar en la Figura 2.4, de acuerdo al comportamiento normal del dipolo, el valor de la frecuencia de resonancia para las distintas longitudes varía considerablemente, de forma inversamente proporcional, es decir, a mayor longitud del dipolo disminuye la frecuencia de resonancia.

Observando los resultados obtenidos, el mejor nivel de adaptación ($|S_{11}| < -10$ dB) se obtiene para un dipolo de tamaño 62mm ($0.41\lambda_{2\text{GHz}}$). En principio, es lógico pensar que el dipolo que presentará mejor adaptación fuera el dipolo $\lambda/2$, puesto que debido a su buen comportamiento es el más utilizado. Sin embargo la presencia del sustrato, hace que el comportamiento del dipolo varíe de forma considerable como hemos podido comprobar en la gráfica.

Como vemos en la figura 2.5, el dipolo $0.41\lambda_{2\text{GHz}}$ sigue comportándose como se espera de él, ya que tiene un diagrama de radiación omnidireccional en el plano XZ, con un nulo en la dirección del eje, es decir, la emisión es máxima en el plano perpendicular a la antena y cero en la dirección de la corriente.

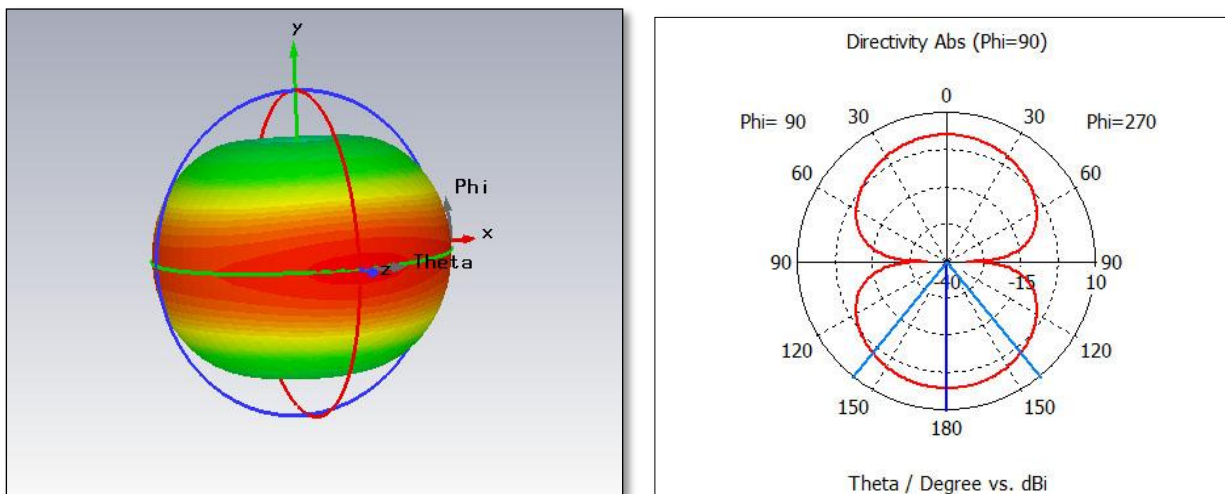


Figura 2.5: Diagrama de radiación 3D y coordenadas polares del dipolo

2.2.2. Cálculo del ancho de los brazos del dipolo

Visto como afecta la longitud del dipolo en la adaptación de la antena, en este siguiente apartado vamos a variar el ancho de los brazos del dipolo, dejando el resto de parámetros fijos, para ver en qué grado afecta para nuestro diseño del dipolo.

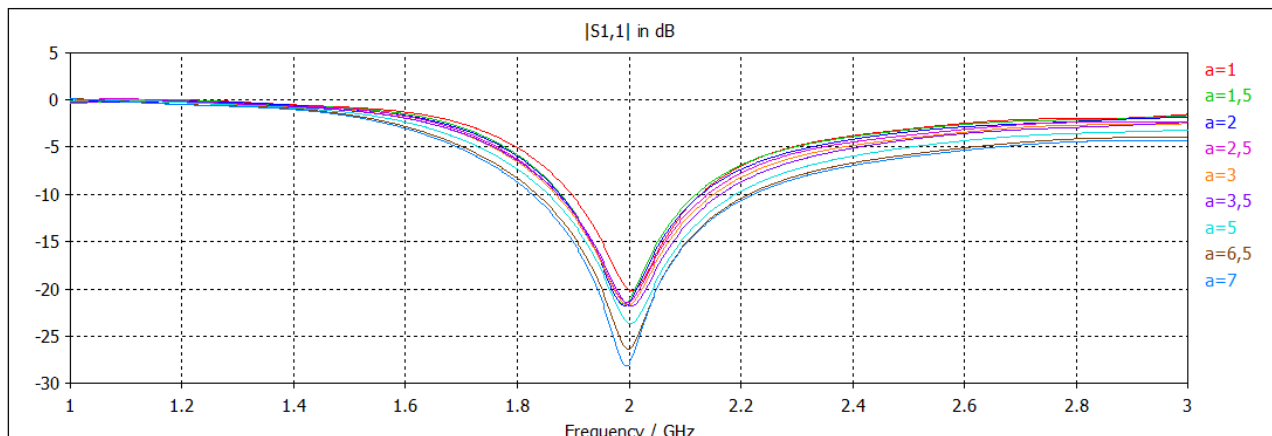


Figura 2.6: S_{11} (dB) para distintos anchos del brazo del dipolo

Hemos variado el ancho en unos valores entre 1mm y 7mm, pudiendo comprobar que para cualquiera de los anchos de los brazos del dipolo obtenemos un buen nivel de adaptación por debajo todos ellos de -20dB y centrados en la frecuencia de resonancia esperada. Además podemos ver que la relación entre la variación entre el valor “a” que identifica al ancho del dipolo y el nivel de adaptación de la antena es directamente proporcional ya que al aumentar “a” conseguimos un mejor nivel de adaptación. Sin embargo la diferencia no resulta considerable, y puesto que la frecuencia de resonancia no varía, en este caso aunque nos resulte mejor un tamaño mayor, por motivos de diseño escogeremos un valor intermedio de 2.5 mm.

2.2.3. Cálculo del gap (g)

Otro de los factores cuya longitud puede hacer variar los resultados es el gap. Conocemos como anchura del gap a la distancia entre metalizaciones adyacentes, en este caso, los brazos del dipolo, y permite controlar el acoplamiento entre las mismas. Como vimos en el apartado para el cálculo de la longitud del dipolo, la longitud adecuada para el brazo del dipolo es de 62mm, por tanto variaremos g teniendo en cuenta ese valor y el de $a=2.5$ mm visto en el apartado anterior. Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente gráfica:

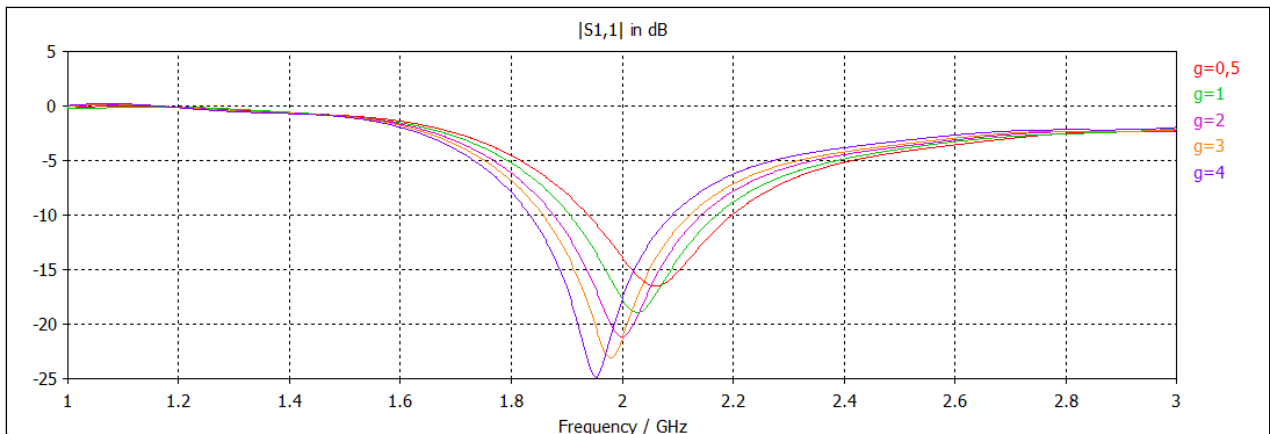
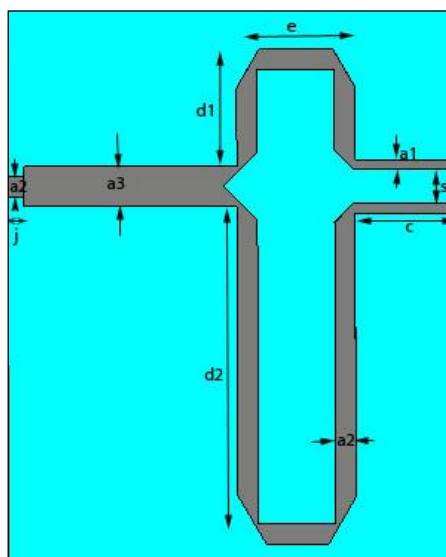


Figura 2.7: S_{11} (dB) para distintos anchos de gap

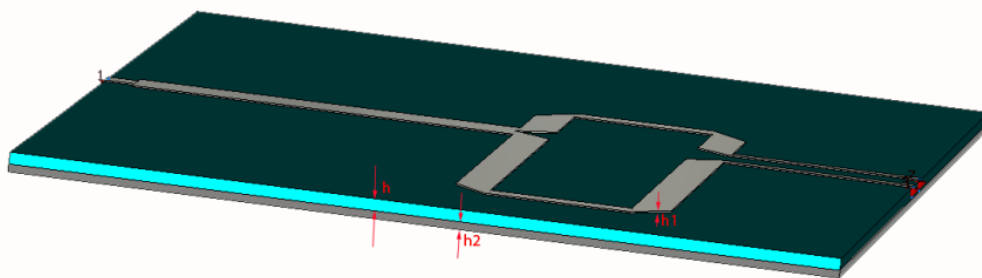
El nivel de adaptación podemos ver que sigue siendo óptimo para todos los casos pero se puede comprobar que este parámetro, a diferencia del anteriormente estudiado, sí hace variar la frecuencia de resonancia. Vemos que a mayor separación de los brazos la frecuencia de resonancia disminuye ya que el dipolo se hace más grande, aunque no es una diferencia muy grande. De todas formas elegiremos el valor de 2mm que es el que más se ajusta a la frecuencia de 2GHz con la cual trabajamos.

2.3 Estudio del balun

Como citamos anteriormente, hemos tomado para el diseño de nuestro balun como referencia el modelo esquemático propuesto en [1] sobre la alimentación de una antena Yagi-Uda mediante un balun, adaptándola a nuestro modelo con un dipolo. En este primer apartado, analizaremos el balun por separado viendo su funcionamiento, para en posteriores apartados analizarlo en conjunto con el dipolo. El diseño propuesto es el siguiente:



a) Vista superior



b) Vista en perspectiva

Figura 2.8: Esquema del balun

Inicialmente hemos tomado las siguientes longitudes, basándonos como hemos dicho en el balun para la alimentación de la antena Yagi-Uda, intentaremos posteriormente mantener las proporciones entre los distintos valores:

Características del balun		
Metalización	Referencia	Valor
	a1	0.3 mm
	a2	0.6 mm
	a3	1.2 mm
	c	1.8 mm
	d1	1.8 mm
	d2	4.65 mm
	e	2.1 mm
	s	0.6 mm
Sustrato	Lado	76 mm
	Espesor	0.78
	Material	Polietileno ($\epsilon_r = 2.2$)

Tabla 2.2: Valores del balun

El objetivo del balun es crear un desfase de 180° entre los dos brazos de salida de manera que se cancele la corriente que regresa por la malla a una determinada frecuencia, en nuestro caso 2GHz, para ello la diferencia de longitud entre los brazos del balun (a cuyas longitudes hemos denotado como $d1$ y $d2$) debe ser de $\lambda/4$ puesto que la onda sufre un desfase con la distancia, y para esa distancia conseguiremos un desfase de 180° con respecto a la otra. Además otra de las características que debe de tener el balun es que debe de funcionar como divisor de potencia repartiendo la potencia a partes iguales entre los dos brazos para que llegue con la misma amplitud a la antena. Por lo tanto las graficas que debemos analizar para el diseño del balun son además del $S_{11}(\text{dB})$ para ver el nivel de adaptación a la frecuencia deseada que hemos visto en los apartados anteriores, también estudiaremos las graficas de $S_{12}(\text{dB})$ y $S_{13}(\text{dB})$ para comprobar que el nivel de señal se reduce en 3dB (la mitad) respecto a lo que se inyecta por el puerto 1, y la relación entre los argumentos de S_{12} y S_{13} para ver si a la frecuencia de resonancia cumplen el desfase entre ambas de 180° . Puesto que el diseño para la antena Yagi-Uda está realizado para una frecuencia de 10GHz, y para un sustrato con una permitividad de 10.2, debemos recalcular las dimensiones, para adaptarlo a nuestras necesidades. Obraremos de la misma forma que en los anteriores casos, haciendo barridos para los valores a estudiar dejando el resto fijos para analizar cuál de los valores es el que mejor se adapta a nuestras necesidades.

2.3.1 Cálculo de las longitudes d1 y d2

Los primeros valores que analizaremos son a priori los más importantes ya que su tamaño influirá en el correcto funcionamiento de nuestro balun.

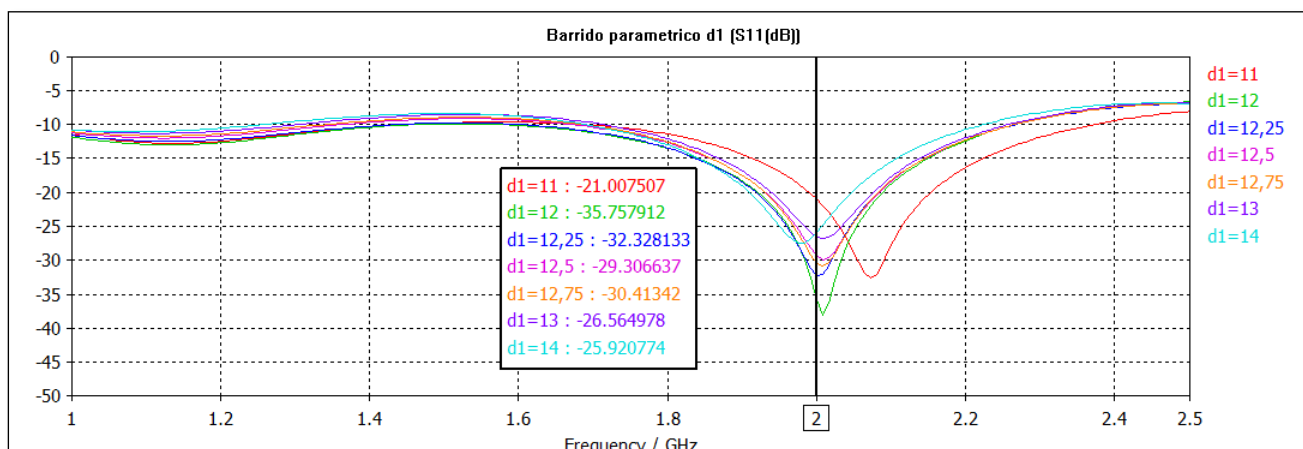


Figura 2.9: S11 (dB) para distintas longitudes de d1 y d2 en el balun

Como dijimos anteriormente para que el balun cumpla con su cometido, la diferencia entre las longitudes de d1 y d2 debe ser $\lambda/4$ para que la señal en su camino más largo sufra un desfase de 180° en un brazo con respecto al otro.

La grafica muestra un barrido de d1, siendo $d2 = d1 + \lambda/4$, con el resto de los parámetros fijos para ver para qué longitud es la que muestra mejor adaptación y se acerca más a la frecuencia de resonancia. Como vemos la longitud d1=12mm es la que mejor adaptación tiene entre las que más cerca están de 2GHz. Hay longitudes que aproximan su mínimo más a esta frecuencia pero tienen peor nivel de adaptación, por ello nos hemos decidido por 12mm. Esto implica que $d2 = 12 + \frac{\lambda}{4} = 38.5\text{mm}$.

El desfase de 180° es uno de los requisitos como dijimos antes para nuestro balun, el otro es el que actúe como divisor de potencia, para ello debemos analizar las graficas de S12 (dB) y S13 (dB)

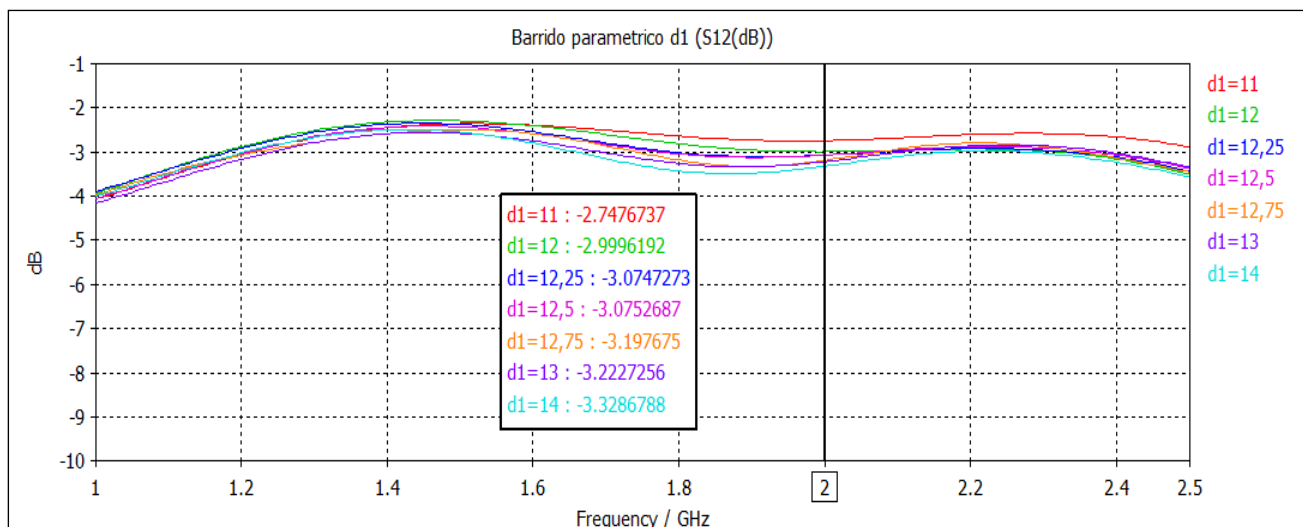


Figura 2.10: S12 (dB) para distintas longitudes de d1 y d2 en el balun

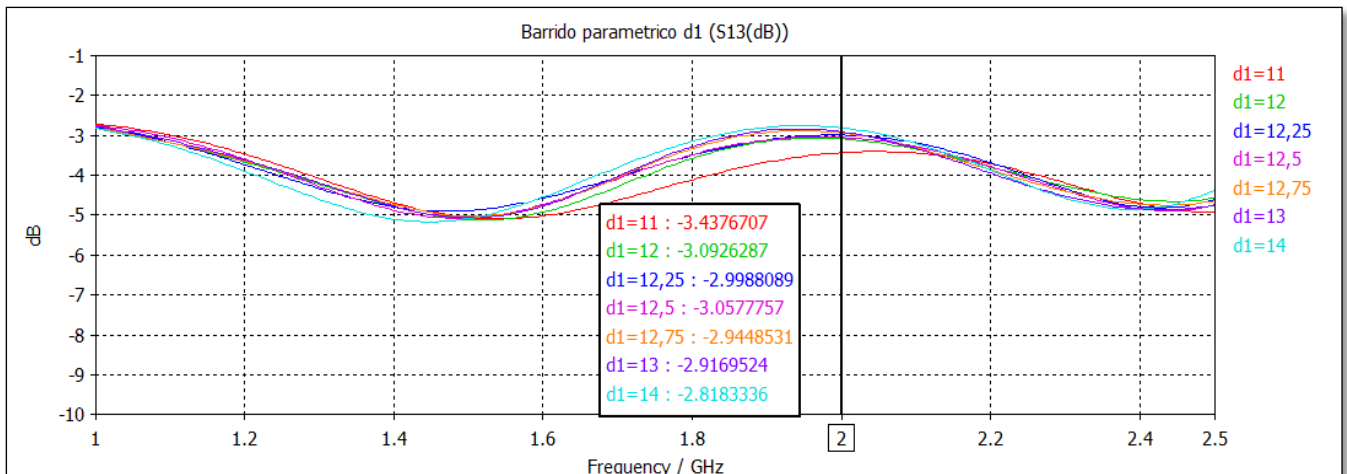


Figura 2.11: S13 (dB) para distintas longitudes de d1 y d2 en el balun

En las figuras 2.10 y 2.11 podemos comprobar que el nivel en el que decae la potencia en los puertos 2 y 3 con respecto al puerto número 1, sufre una variación poco significativa al variar el tamaño d1. Sin embargo lo que si podemos comprobar es que para el valor elegido de d1=12mm a la frecuencia de 2 GHz obtenemos $S_{12} \approx S_{13} \approx -3\text{dB}$, lo que quiere decir que se reparte la potencia de entrada a la mitad para cada uno de los puertos, premisa necesaria a la hora del diseño del balun.

Para asegurarnos de que las longitudes que elegimos anteriormente, consiguen que el desfase entre los brazos sea de 180° vamos a analizar la fase de S12 y S13 comparándolas en la misma grafica.

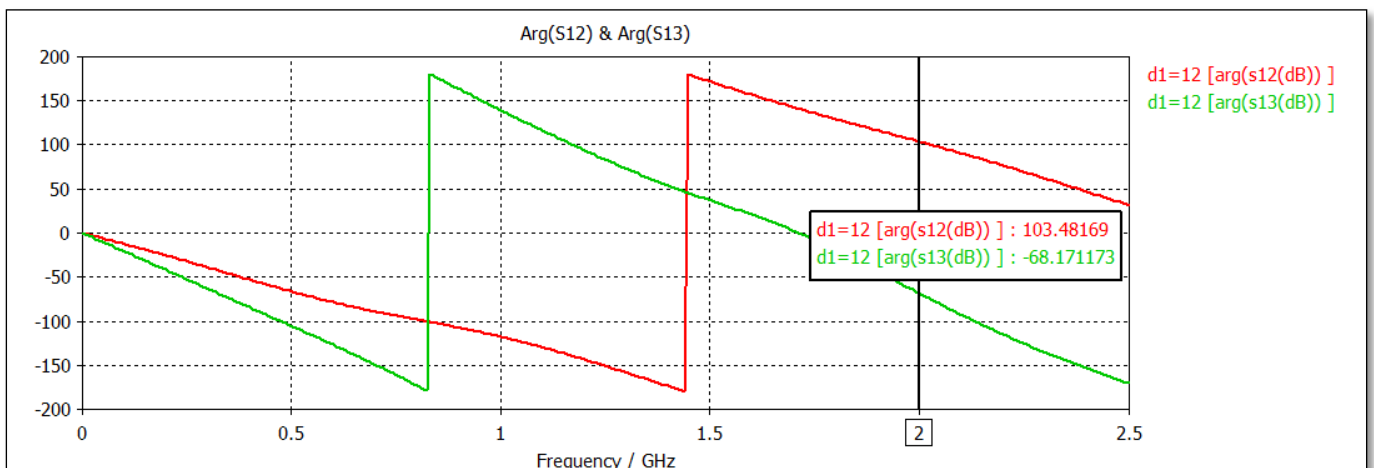


Figura 2.12: Comparativa de la fase de S12 y S13 para d1 =12mm y d2=38.5mm

En la Figura 2.12 vemos que para la d1 elegida, conseguimos un desfase de aproximadamente 172° que aunque no conseguimos el desfase deseado se aproxima bastante, suficiente para que se anulen las corrientes que regresan por la malla a la frecuencia de 2GHz.

2.3.2 Cálculo del tamaño de a_2 (anchura brazo balun)

Otro de los parámetros a estudiar y que como vimos en el estudio del dipolo también es influyente es el ancho de la metalización que en nuestro caso hemos nombrado como “ a_2 ” como vimos en la figura 2.8. Igualmente al caso anterior de la longitud del brazo, debemos analizar las graficas de S_{11} , S_{12} y S_{13} .

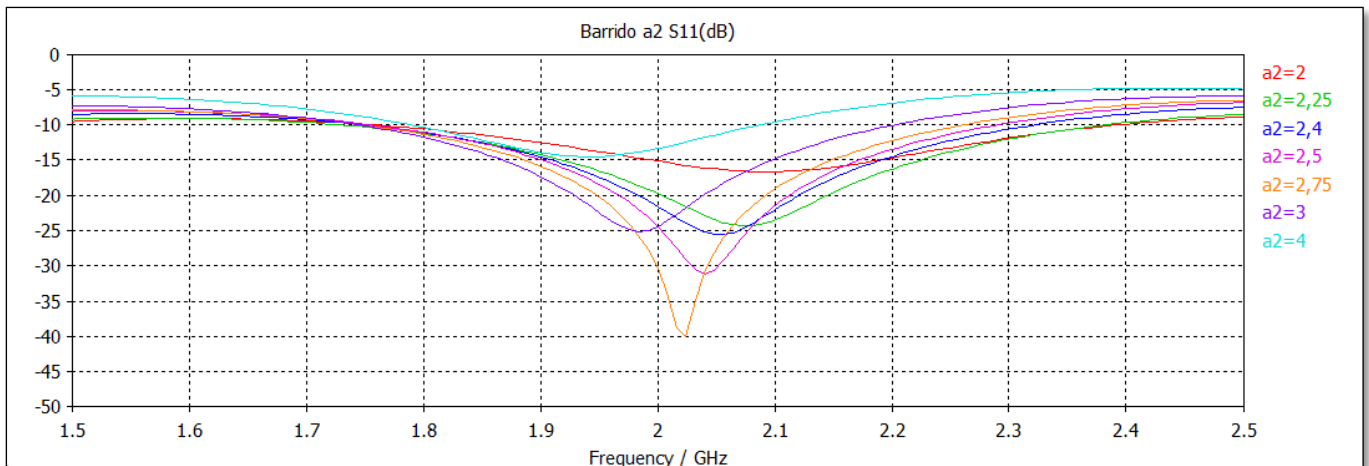


Figura 2.13: S_{11} (dB) para distintos valores de a_2 (anchura brazo dipolo)

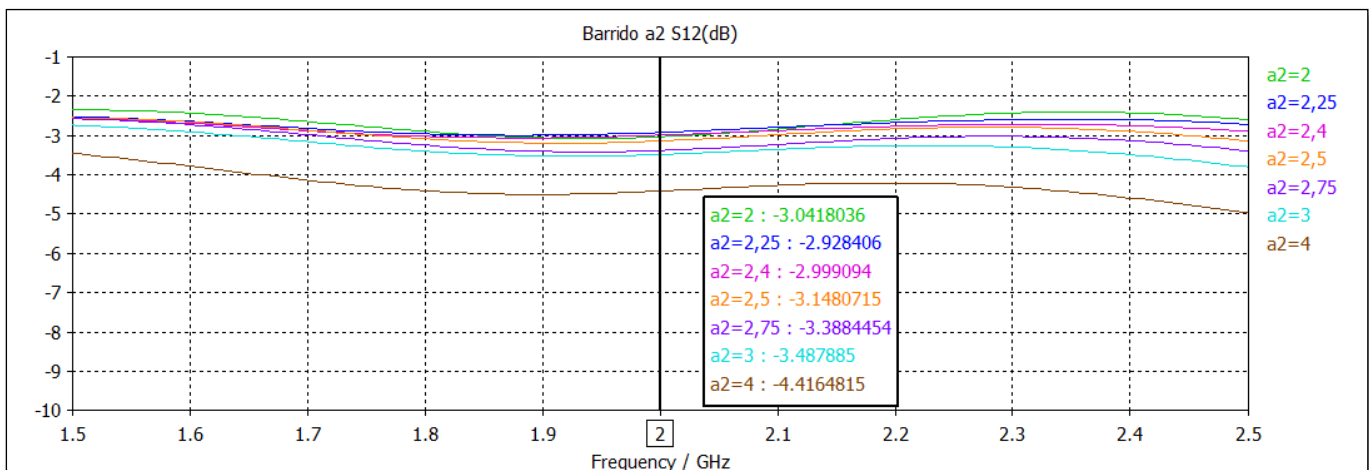


Figura 2.14: S_{12} (dB) para distintos valores de a_2 (anchura brazo dipolo)

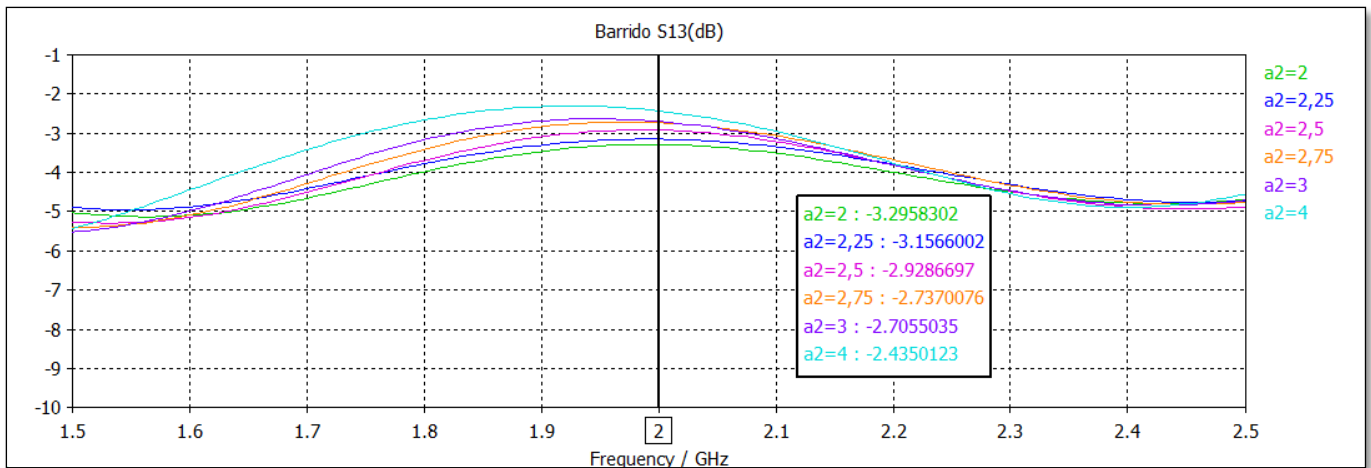


Figura 2.15: S13 (dB) para distintos valores de a2 (anchura brazo dipolo)

En la figura 2.13 vemos la relación entre la anchura de los brazos del dipolo (a_2) y el coeficiente de reflexión, como podemos ver el nivel de adaptación varía considerablemente entre una y otra dimensión, siendo 2.75mm la que mejor adaptación tiene y más se acerca a la frecuencia de resonancia.

Sin embargo como vemos en la Figuras 2.14 y 2.15 la potencia de entrada, para un ancho del brazo de 2.75 mm, no se reparte en partes iguales entre los brazos del balun llegando más potencia a un brazo que al otro. Es por ello por lo que nos hemos decidido por tomar una dimensión de $a_2=2.4$ mm que como podemos ver en la figura 1.13, tiene un nivel de adaptación aceptable cercano a -25dB alrededor de la frecuencia de resonancia de 2GHz y decae 3dB en cada una de las ramas, como vemos en las figuras 2.14 y 2.15. Queda por comprobar si efectivamente cumple además que entre estas ramas tenemos un desfase de 180° para evitar la corriente de retorno.

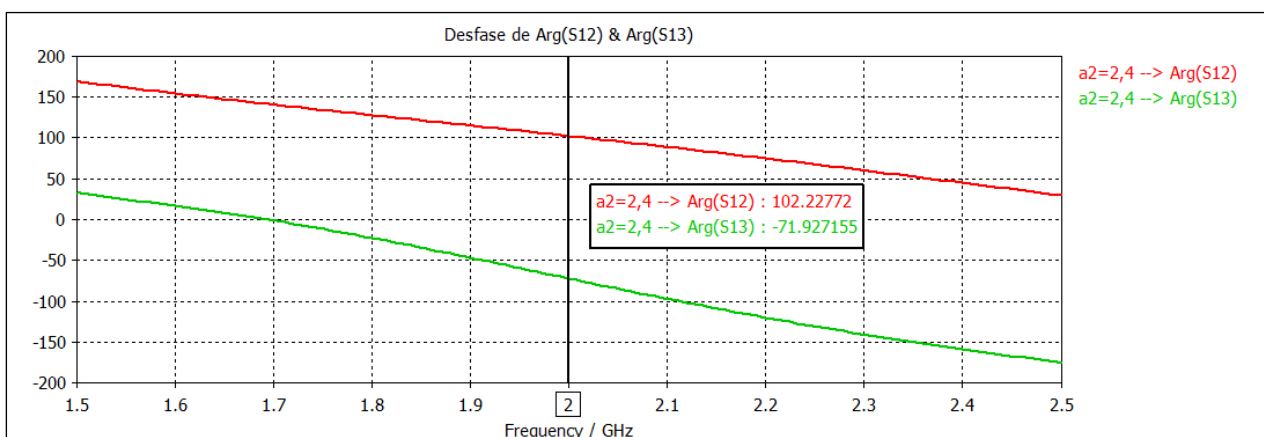


Figura 2.16: Comparativa de la fase de S12 y S13 para $a_2=2.4$ mm

Vemos que el desfase obtenido es aproximadamente de 174° , que podemos considerar bastante cercano a los 180° deseados, por lo que definitivamente nos quedaremos con el valor de $a_2=2.4$ mm.

Notar que como decidimos guiarnos por el modelo para la antena Yagi-Uda y de mantener la proporcionalidad entre las dimensiones del balun, los valores de los otros anchos de brazos de nuestro esquema los cuales denominamos como “a1” y “a3” en la figura 2.8, serán la mitad y el doble de “a2” respectivamente. Además también podemos comprobar que esta misma dimensión es la que se utiliza en el conector al cable coaxial para obtener una impedancia $Z_0 = 50 \Omega$.

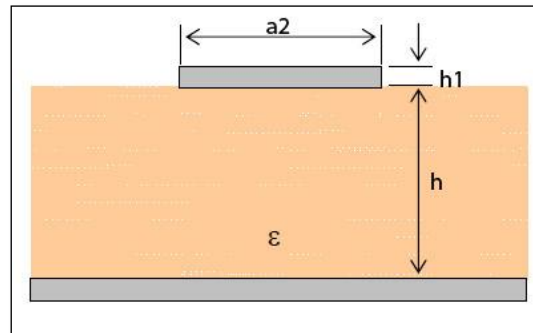


Figura 2.17: Esquema línea de transmisión microstrip

2.3.3 Barrido paramétrico permitividad sustrato

Otro de los parámetros a estudiar y que afectan a la frecuencia de resonancia es la permitividad del sustrato. Aunque esta variable sólo puede tomar ciertos valores, dependiendo de los materiales de que dispongamos para la posterior fabricación de la antena, en las siguientes graficas podemos ver que la elección de un valor u otro hace variar significativamente la frecuencia de resonancia y por tanto seguro que haría variar el resto de las dimensiones de los parámetros. Nosotros hemos elegido un material con permitividad relativa de 2.2, adecuando el resto de parámetros para que la frecuencia de resonancia se acercara a los 2 GHz deseados.

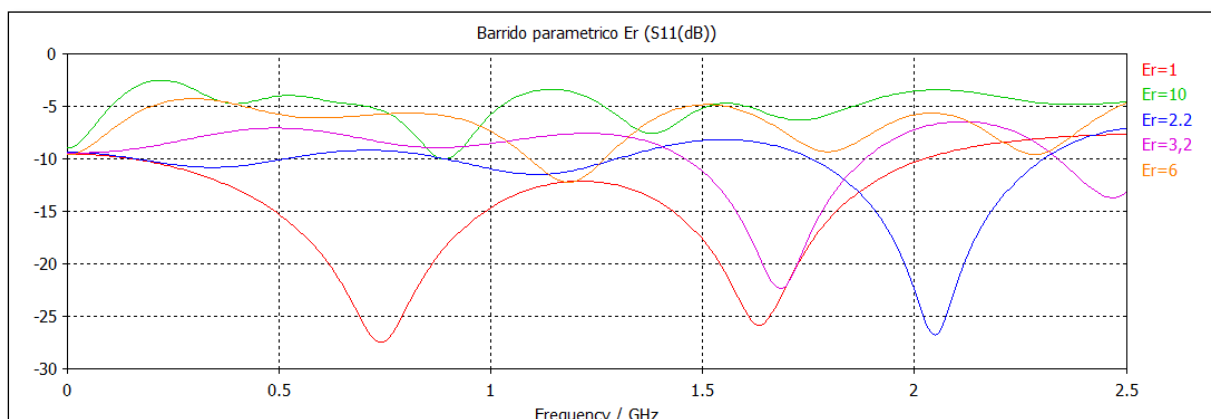


Figura 2.18: S11 (dB) para distintos valores de la permitividad ϵ_r

2.4 Caracterización del conjunto balun-dipolo

Una vez determinadas las dimensiones tanto del dipolo, para que la frecuencia de funcionamiento sea de 2GHz y la adaptación sea máxima, como del balun para que funcione como divisor de potencia y se consiga un desfase 180° entre cada una de las ramas, el siguiente paso será el de analizar el conjunto balun-dipolo. El esquema sería el siguiente:

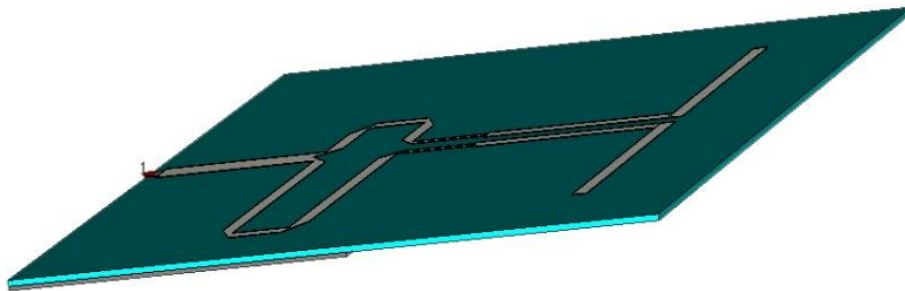
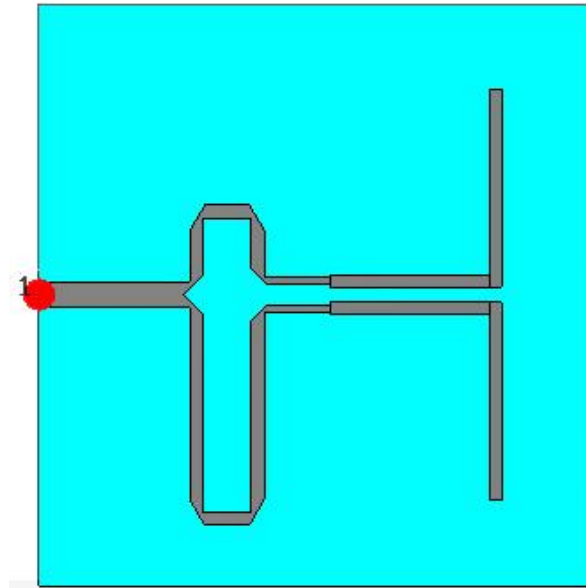


Figura 2.19: Esquema del conjunto balun y dipolo

Nótese que para la construcción del circuito del balun empleamos la tecnología microstrip. Una estructura microstrip está hecha de una fina capa de un material aislante llamado sustrato dieléctrico. Éste material está completamente cubierto de metal por la parte inferior llamada plano de masa, y parcialmente recubierto de metal por la parte superior donde el circuito o la antena están impresos. El sustrato dieléctrico es la base del circuito microstrip, constituye un soporte estable para las tiras conductoras y los parches que conforman las conexiones, los resonadores y las antenas. El sustrato también tiene la función de concentrar el campo electromagnético y prevenir en el circuito radiaciones no deseadas. La permitividad dieléctrica y grosor del sustrato determinan las características del circuito o la antena. Nótese también como vemos en la Figura 2.19 que el dipolo está únicamente sobre un sustrato sin plano metálico debajo.

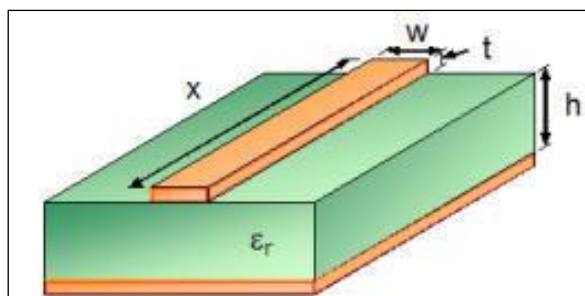


Figura 2.20: Esquema de tecnología microstrip

2.4.1 Nivel de adaptación

En los apartados anteriores del estudio se han calculado el tamaño y el grosor óptimos del dipolo para conseguir la máxima adaptación a la frecuencia de 2GHz, y las longitudes de las ramas del balun para conseguir el desfase adecuado entre ellas además de que la potencia introducida por el puerto 1 se divida 3dB para cada una de las ramas. En este apartado veremos los resultados que se obtienen al unir el dipolo a las ramas de salida del balun.

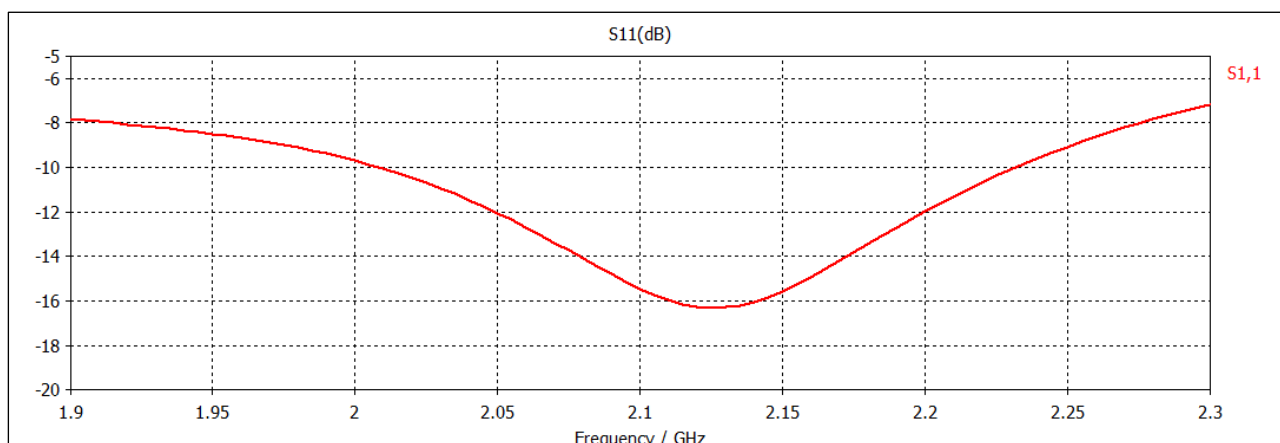


Figura 2.21: Nivel de adaptación del conjunto balun y dipolo

Atendiendo al resultado vemos que el nivel de adaptación es bueno, ya que el mínimo se encuentra aproximadamente a -16dB, además apreciamos que se encuentra en una frecuencia muy cercana a la buscada. El diagrama de radiación se presentara en el capítulo 4 cuando se analice el dipolo con distintos planos.

Capítulo 3.

Estructuras AMC

3.1 Introducción

En este siguiente capítulo pasaremos a estudiar los planos de masa artificiales, sobre los que irá nuestra antena. Vamos a estudiar dos tipos diferentes de metalizaciones que comentaremos más adelante. La forma de la metalización es uno de los factores que afectan directamente a la fase de la onda reflejada en la superficie. Variando el tipo de metalización, conseguiremos estructuras más o menos compactas. En este estudio vamos a analizar dos tipos de estructura, con metalización en anillo y con metalización de dos anillos concéntricos. La ventaja de esta geometría es que no depende de la polarización además de ser completamente plana.

En este apartado, para optimizar la estructura debemos hacer un estudio de la fase en la superficie del plano cuando sobre ella incide una onda plana. Para ver qué ocurre con dicha fase se considera un puerto de guía de onda colocado a una distancia cercana sobre la superficie de la celda unidad. Dicho puerto genera una onda cuya polarización queda fijada por las condiciones de contorno aplicadas y cuya reflexión se mide. La fase de este coeficiente de reflexión nos permitirá diferenciar entre conductores eléctricos perfectos (PEC) y conductores magnéticos perfectos (PMC), en el primer tipo la fase de la onda reflejada cuando sobre ella incide una onda plana es de 180° , mientras que en las superficies PMC será de 0° . En nuestro caso, buscamos el comportamiento de conductor magnético artificial (AMC), que presenta el mismo comportamiento que las superficies PMC. Elegimos este tipo de superficie puesto que su comportamiento como conductor magnético hace que las corrientes imagen paralelas a ellas estén en fase con la corriente original, impidiendo que se anulen como ocurriría con los PEC. Esto nos permite colocar los elementos, en nuestro caso antenas, más cerca de la superficie AMC, consiguiendo así estructuras de más bajo perfil que si tuviésemos que colocar el elemento perpendicularmente a la superficie como es habitual con planos metálicos.

Para diseñar superficies AMC se utilizan generalmente estructuras periódicas. Nosotros vamos a analizar tres tipos de estructuras, el anillo simple, dos anillos concéntricos, anillos superpuestos en forma de multicapa. Para conocer un poco mejor la influencia del tipo de metalización, primeramente analizaremos una celda unidad para posteriormente repetirlo periódicamente para obtener la superficie definitiva.

3.2 Estructuras con metalización en anillo

Primero haremos un estudio de la influencia de cada uno de los parámetros de la metalización en anillo en la fase de la onda reflejada. Para poder determinar el efecto que se consigue con la variación de una dimensión sobre la onda reflejada, mantendremos constantes el resto de parámetros de la estructura, variando únicamente el valor a estudiar. Los parámetros de referencia por defecto que hemos considerado para esta primera estructura son:

Características del anillo		
Metalización	Referencia	Valor
	R_ext	14.5 mm
	R_int	13.5 mm
	h1	1.5 mm
Sustrato	w	13 mm
	h	1.78 mm
	Material	Polietileno ($\epsilon_r = 2.2$)

Tabla 3.1: Valores iniciales de la estructura con metalización en anillo

En la Figura 3.1 podemos ver el esquema de una celda para la estructura de la metalización en anillo, así como cada una de las denominaciones que se le dan a los parámetros que necesitaremos a la hora de hacer el estudio. Como vemos la metalización se apoya sobre un sustrato, el cual tiene debajo un plano de masa.

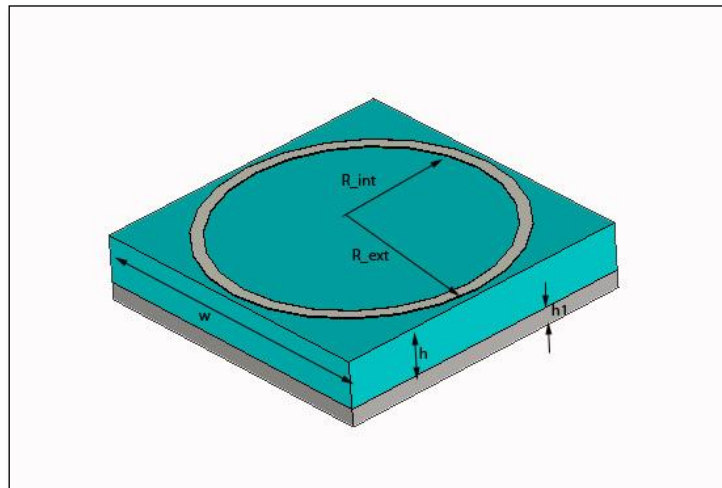


Figura 3.1: Esquema celda con metalización en anillo

En la figura 3.2 vemos el resultado de la simulación para los valores iniciales que dimos al anillo. Como explicamos anteriormente, necesitamos que la fase de la onda reflejada sea 0° en la frecuencia de resonancia, en nuestro caso 2GHz. Como vemos en la figura 3.2 conseguimos que la fase sea 0° en una frecuencia de aproximadamente 2.5 GHz por lo que deberemos de variar algunos de los parámetros para conseguir los resultados óptimos que buscamos.

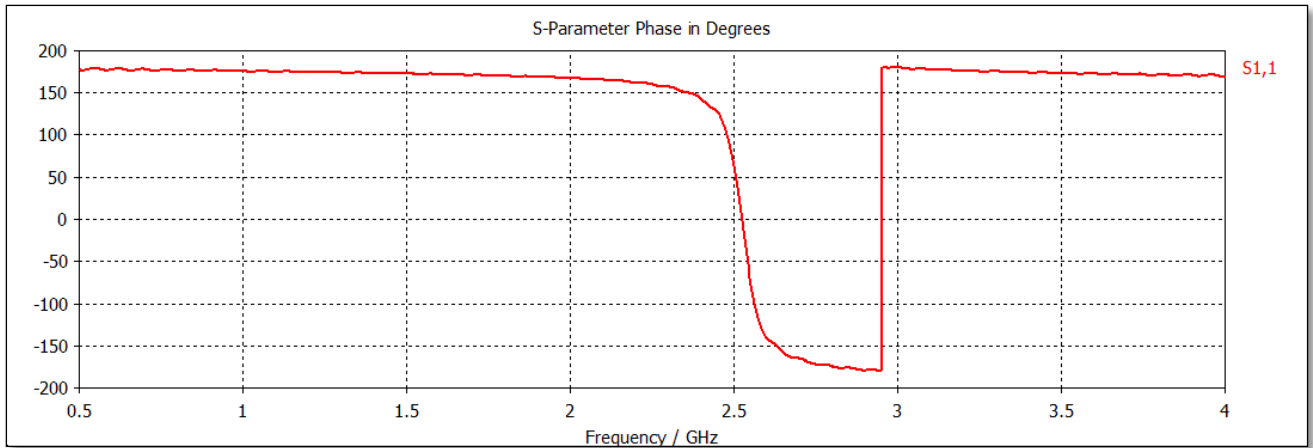


Figura 3.2: Fase de la onda reflejada para los valores iniciales

Los parámetros que afectan directamente al valor de la fase de la onda reflejada en la superficie AMC son: periodo (w), grosor del sustrato (h), permitividad del sustrato (ϵ_r), y el ancho de la metalización del anillo, caracterizado por los valores del radio exterior (R_{ext}) e interior (R_{int}) del mismo. Haremos un estudio de cada uno de ellos para ver su influencia en la fase de la onda reflejada.

3.2.1 Barrido paramétrico permitividad (ϵ_r)

La permitividad relativa es uno de los parámetros utilizados para controlar la fase de la onda reflejada en la superficie AMC. Para nuestro estudio hemos utilizado varios sustratos con diferentes permitividades para comprobar las diferencias entre ellas. También, para tener una referencia, hemos considerado como sustrato el aire cuya permitividad es 1. Para analizar estas diferencias hemos considerado fijos el resto de parámetros variando únicamente la permitividad del sustrato. Los resultados se han recogido en la Figura 3.3.

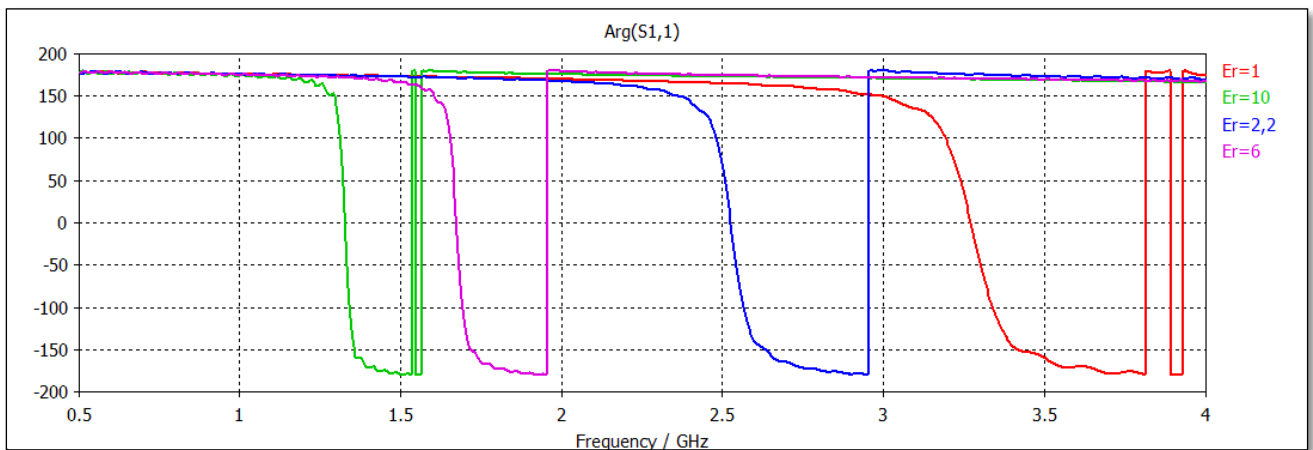


Figura 3.3: Fase de la onda reflejada para distintos valores de la permitividad

Permitividad(ϵ_r)	Frec. Resonancia magnética	Ancho de banda ($BW_{\pm 90^\circ}$)
$\epsilon_r=1$	3.27 GHz	111MHz.
$\epsilon_r=2,2$	2.52 GHz	72 MHz
$\epsilon_r=6$	1.67 GHz	34 MHz
$\epsilon_r=10$	1.32 GHz	23 MHz

Tabla 3.2: Frecuencia de la fase reflejada nula y ancho de banda para distintos valores de permitividad

Atendiendo al comportamiento de la fase de la onda reflejada, se puede decir que la variación además de que es bastante grande entre los distintos sustratos también se puede comprobar que es inversamente proporcional respecto a la frecuencia, ya que a una mayor permitividad la frecuencia en la que la fase del coeficiente de reflexión es 0 es menor, como vemos en el caso de referencia del aire ($\epsilon_r=1$), en el que vemos que la frecuencia de resonancia se sitúa en 3.27 GHz. Nosotros como hemos venido contando en el resto del proyecto, utilizaremos el sustrato común de polietileno cuya permitividad es 2.2, siendo además la que más se acerca a la frecuencia esperada de 2GHz, para las dimensiones elegidas

3.2.2 Barrido paramétrico altura sustrato (h)

La altura o grosor del sustrato es otro de los parámetros a tener en cuenta a la hora de nuestro diseño, ya que influye de manera sustancial, como veremos, en la fase de la onda reflejada. Hemos elegido varios grosores, siempre manteniéndonos dentro de unos niveles lógicos para nuestro sustrato, y hemos recogido los resultados obtenidos en la figura 3.4:

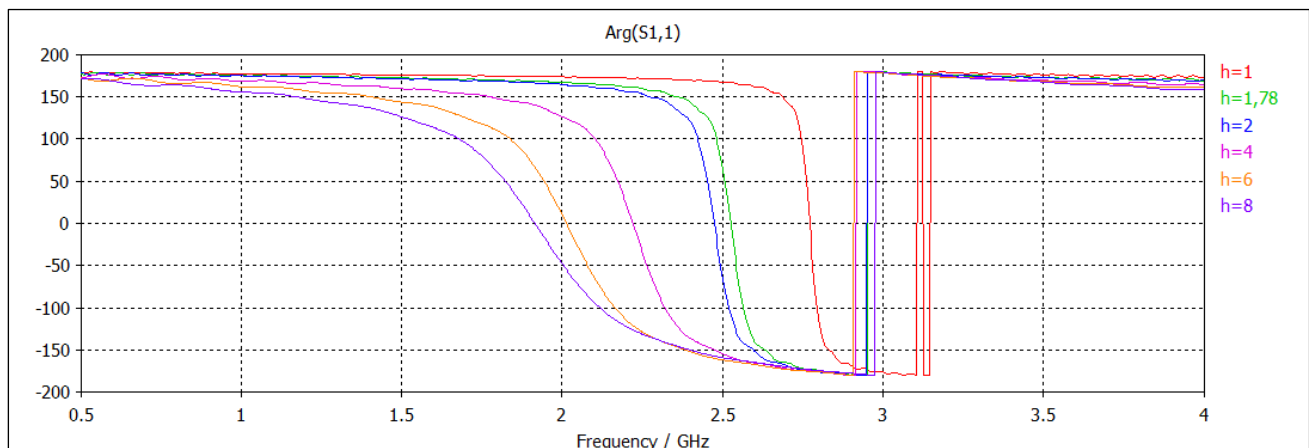


Figura 3.4: Fase de la onda reflejada para distintos valores de la altura del sustrato

Altura sustrato(h)	Frec. Resonancia magnética	Ancho de banda ($BW_{\pm 90^\circ}$)
h=1	2.77 GHz	43 MHz
h=1.78	2.52 GHz	72 MHz
h=2	2.47 GHz	84 MHz
h=4	2.22 GHz	187 MHz
h=6	2.01 GHz	280 MHz
h=8	1.91 GHz	380 MHz

Tabla 3.3: Frecuencia de la fase reflejada nula y ancho de banda para distintos valores de la altura del sustrato

Como vemos tanto en la figura 3.4 como en la tabla 3.2, la altura o grosor del dieléctrico con la que conseguimos unos mejores resultados para nuestra antena es de 6mm, ya que conseguimos que la fase se anule a la frecuencia de 2 GHz. Sin embargo por motivos de diseño y de disponibilidad hemos de elegir el sustrato con un grosor de h=1.78mm, que aunque vemos que la frecuencia a la que se anula la fase se aleja en aproximadamente 500 MHz de la frecuencia deseada, intentaremos mediante la variación del resto de parámetros que se acerque a los 2GHz. También es muy destacable el hecho de que según aumentamos el espesor del sustrato, conseguimos aumentar en gran medida el ancho de banda.

Por tanto para los siguientes estudios de dimensiones utilizaremos el sustrato con permitividad relativa de 2.2 y grosor de 1.78 mm.

3.2.3 Barrido paramétrico del periodo(w)

Llamamos “w” o periodo, al tamaño de la celda que se repetirá de forma periódica en el plano AMC que pretendemos diseñar.

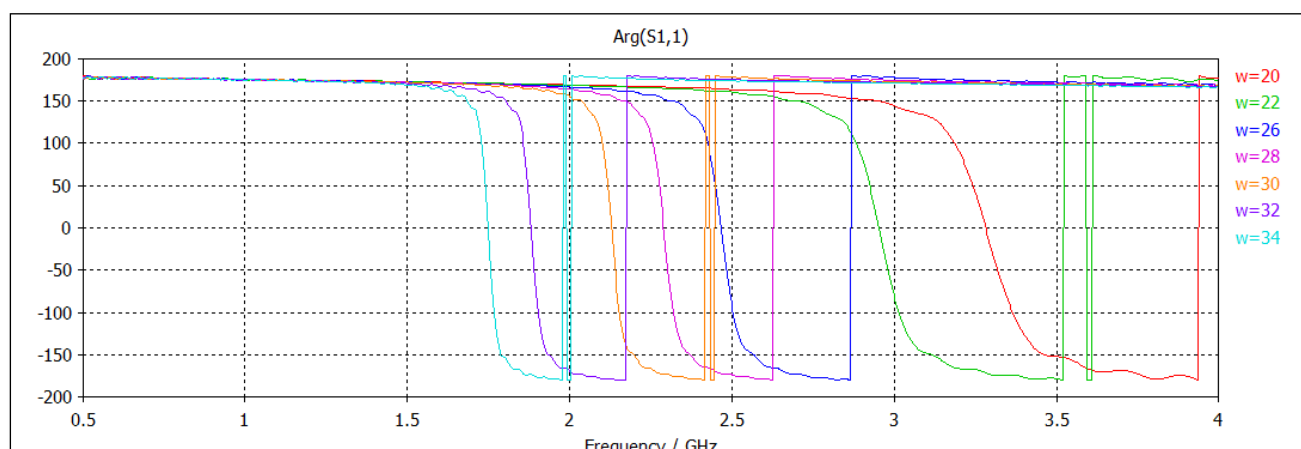


Figura 3.5: Fase de la onda reflejada para distintos valores del ancho de la celda unidad

Periodo(w)	Frec. Resonancia magnética	Ancho de banda ($BW_{\pm 90^\circ}$)
w=20	3.28 GHz	150 MHz
w=22	2.95 GHz	109 MHz
w=26	2.46 GHz	65 MHz
w=28	2.28 GHz	52 MHz
w=30	2.12 GHz	45 MHz
w=32	1.88 GHz	37 MHz
w=34	1.75 GHz	30 MHz

Tabla 3.4: Frecuencia de la fase reflejada nula y ancho de banda para distintos valores de la longitud del periodo

Como podemos comprobar en la figura, es significativa la variación de la frecuencia de resonancia cuando aumentamos el tamaño de la celda, siendo ambas variables inversamente proporcionales.

Al analizar los datos en la tabla y en la figura, vemos que los periodos de $w=30\text{mm}$ y de $w=32\text{mm}$ se aproximan a la frecuencia óptima, pero como dijimos antes buscamos la menor posible, por tanto vamos a trabajar con un tamaño de celda de 30mm . Podíamos haber simulado un tamaño de $w=31\text{mm}$, y probablemente hubiésemos conseguido que la fase de la onda reflejada se anulase en 2 GHz , sin embargo por comodidad para los cálculos en los siguientes apartados del proyecto, es conveniente que sea un número más redondo.

3.2.4 Barrido paramétrico con radio exterior fijo

Otro de los parámetros que deseamos estudiar es la influencia del ancho de la metalización del anillo. En este caso lo que variaremos es lo que hemos denominado radio interior dejando fijo el radio exterior, para conseguir una mayor o menor anchura de la metalización.

Nótese que hemos utilizado para esta simulación los datos obtenidos de los apartados anteriores, $\epsilon_r=2.2$, $h=1.78$ y $w=30$.

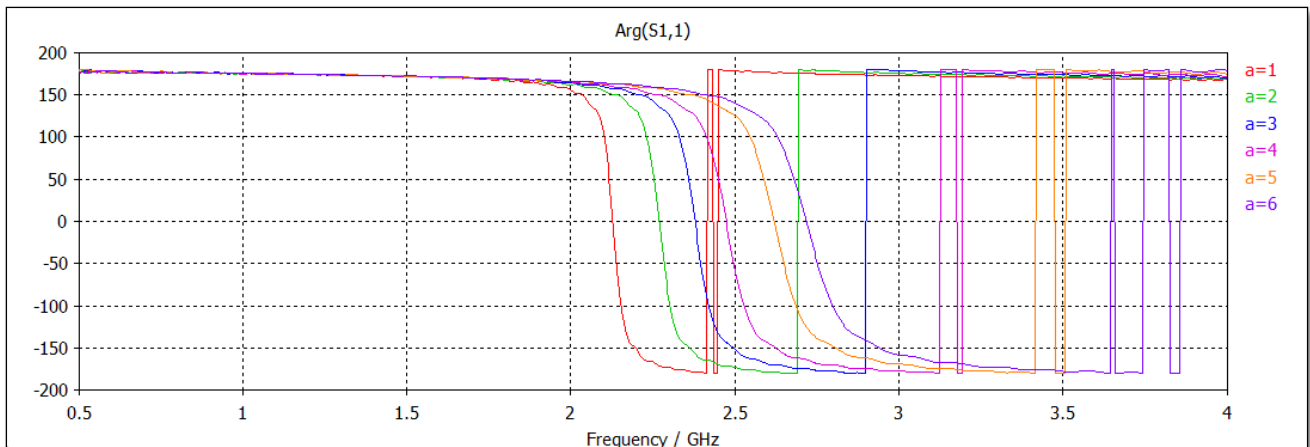


Figura 3.6: Fase de la onda reflejada para distintos valores del ancho del anillo

Ancho del anillo	Frec. Resonancia magnética	Ancho de banda ($BW_{\pm 90^\circ}$)
a=1	2.12 GHz	43 MHz
a=2	2.26 GHz	48 MHz
a=3	2.37 GHz	74 MHz
a=4	2.47 GHz	97 MHz
a=5	2.61 GHz	121 MHz
a=6	2.71 GHz	143 MHz

Tabla 3.5: Frecuencia de la fase reflejada nula y ancho de banda para distintos valores del ancho del anillo

En esta simulación hemos denominado “a” al ancho del anillo, siendo $R_{int}=R_{ext}-a$. Como el R_{ext} permanece fijo lo que variamos es el radio interior del anillo.

Analizando los datos, vemos que para un ancho de anillo de 1 mm, el cual utilizábamos por defecto desde el principio, obtenemos los resultados más óptimos, sin embargo vamos a comprobar si para anchos menores de la metalización podemos conseguir resultados mejores.

Podemos comprobar que a medida que aumenta ‘a’, también aumenta la frecuencia. Esto se debe a que la dimensión que define la frecuencia tiene que ver con el radio intermedio del círculo y al aumentar ‘a’, dejando fijo R_{ext} , este radio intermedio disminuye.

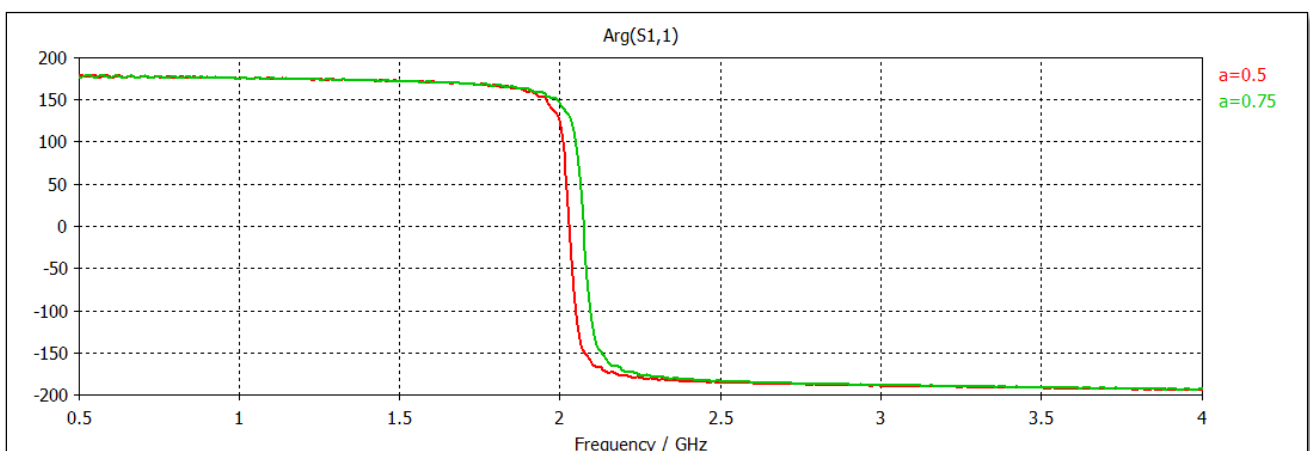


Figura 3.7: Fase de la onda reflejada para valores específicos del ancho del anillo

Ancho del anillo	Frec. Resonancia magnética	Ancho de banda ($BW_{\pm 90^\circ}$)
$a = 0.5$	2.03 GHz	34 MHz
$a = 0.75$	2.07 GHz	39 MHz

Tabla 3.6: Frecuencia de la fase reflejada nula y ancho de banda para otros valores del ancho del anillo

Como vemos en las figura y en la tabla para anchos de la metalización menores de 1 mm la frecuencia a la que se anula la fase de la onda reflejada está muy cercana a 2. Por tanto elegiremos un ancho de anillo de $a=0.5\text{mm}$, para nuestro diseño.

3.2.5 Barrido paramétrico con radio exterior e interior variables.

En este siguiente caso lo que hemos analizado es cómo afecta la colocación del anillo dentro de la celda, siendo siempre concéntrico, es decir con el ancho de anillo fijo que acabamos de calcular, variamos los parámetros de radio exterior e interior.

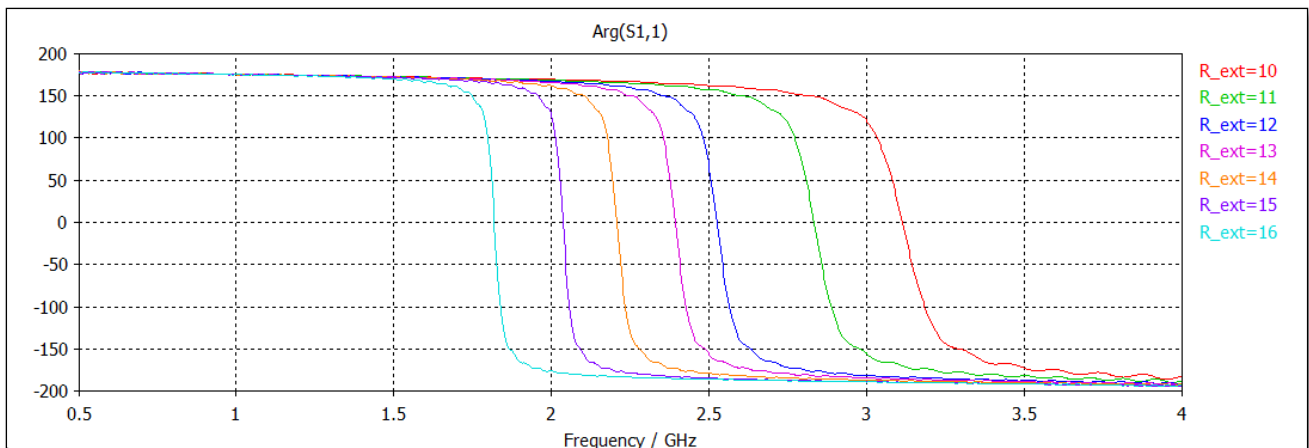


Figura 3.8: Fase de la onda reflejada para distintos valores del radio exterior del anillo

Radio exterior	Radio interior	Frec. Resonancia magnética	Ancho de banda ($BW_{\pm 90^\circ}$)
$R_{\text{ext}}=10$	$R_{\text{int}}=9.5$	3.11 GHz	130 MHz
$R_{\text{ext}}=11$	$R_{\text{int}}=10.5$	2.83 GHz	101 MHz
$R_{\text{ext}}=12$	$R_{\text{int}}=11.5$	2.52 GHz	73 MHz
$R_{\text{ext}}=13$	$R_{\text{int}}=12.5$	2.39 GHz	63 MHz
$R_{\text{ext}}=14$	$R_{\text{int}}=13.5$	2.20 GHz	51 MHz
$R_{\text{ext}}=15$	$R_{\text{int}}=14.5$	2.03 GHz	39 MHz
$R_{\text{ext}}=16$	$R_{\text{int}}=15.5$	1.81 GHz	34 MHz

Tabla 3.7: Frecuencia de la fase reflejada nula y ancho de banda para distintos valores del radio exterior del anillo

Aunque en la gráfica aparezca reflejado como que únicamente se varía el radio exterior, se varían ambos considerado en todos los casos que el radio interior es la diferencia entre el exterior y el ancho fijo del anillo, es decir, $R_{\text{int}}=R_{\text{ext}}-a$.

Analizando los datos, obtenidos podemos ver la gran importancia que tienen estos parámetros en el diseño, ya que en 6 mm existe una diferencia de 300 MHz entre las frecuencias en las que se anula la fase. Como vemos en la figura y en la tabla el resultado óptimo es el de un radio exterior de 15mm.

En general como hemos comprobado, cuanto más grande es el anillo, más baja es la frecuencia de trabajo.

3.3 Estructuras con metalización de dos anillos

Una vez caracterizada la estructura en anillo, vamos a estudiar qué ocurrirá con otro tipo de metalización. En este caso analizaremos el caso de tener una estructura de dos anillos concéntricos. Es decir añadiremos un anillo más a la estructura analizada anteriormente con el fin de ver las consecuencias que tiene en la onda reflejada.

La estructura a analizar está representada en la figura y sus dimensiones se muestran en la tabla, en la cual hemos nombrado a las dimensiones radiales del nuevo anillo como R_{ext_peq} y R_{int_peq} , para poder diferenciarlos de las del otro anillo, y a las que hemos dado unos valores por defecto de 13 mm para el radio exterior y 12 mm para el interior. El resto de dimensiones como vemos en la tabla son las mismas que obtuvimos al analizar la metalización de un solo anillo.

Como hicimos para los casos anteriores, para poder determinar el efecto que se consigue la variación de una dimensión sobre la onda reflejada, mantendremos constantes el resto de parámetros de la estructura.

Características del anillo		
Metalización	Referencia	Valor
	R_{ext}	15.5 mm
	R_{int}	14.5 mm
	R_{ext_peq}	13 mm
	R_{int_peq}	12 mm
Sustrato	h_1	1.5 mm
	w	16.5 mm
	h	1.78 mm
	Material	Polietileno ($\epsilon_r = 2.2$)

Tabla 3.8: Valores iniciales de la estructura con metalización de dos anillos concéntricos

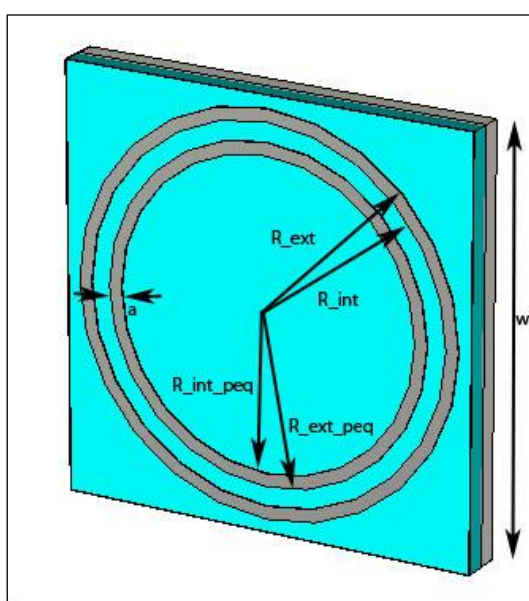


Figura 3.9: Imagen de la celda unidad con dos anillos concéntricos

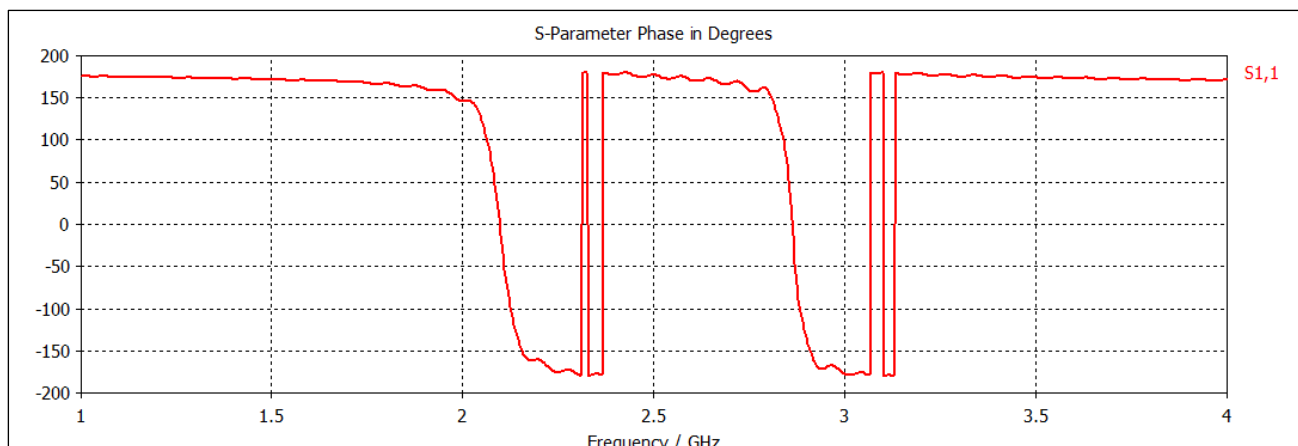


Figura 3.10: Fase de la onda reflejada para los valores por defecto

Para los valores por defecto que hemos asignado a los anillos y al sustrato, podemos ver en la figura que obtenemos dos frecuencias de resonancia la primera en torno a 2.1GHz y la segunda en aproximadamente 2.8GHz, debidas a cada uno de los anillos. En los posteriores estudios veremos la variación que tienen estas frecuencias al variar tanto el ancho como el radio de uno de los anillos, comprobando de esta manera que cada una de las frecuencias resonantes solo depende de un solo anillo.

3.3.1 Variación grosor anillo interior

Hemos denominado anillo interior, para diferenciarlo, al anillo con un radio más pequeño de los dos, el cual es el que modificaremos con el fin de ver la influencia sobre la grafica.

En primer lugar modificaremos el ancho del anillo al que hemos denominado como “a”, dejando fijo el radio exterior del anillo interior, así como el resto de parámetros del plano. Hemos tomado unos valores los cuales entendemos como lógicos para “a” entre 1mm y 3 mm con pasos de medio milímetro. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

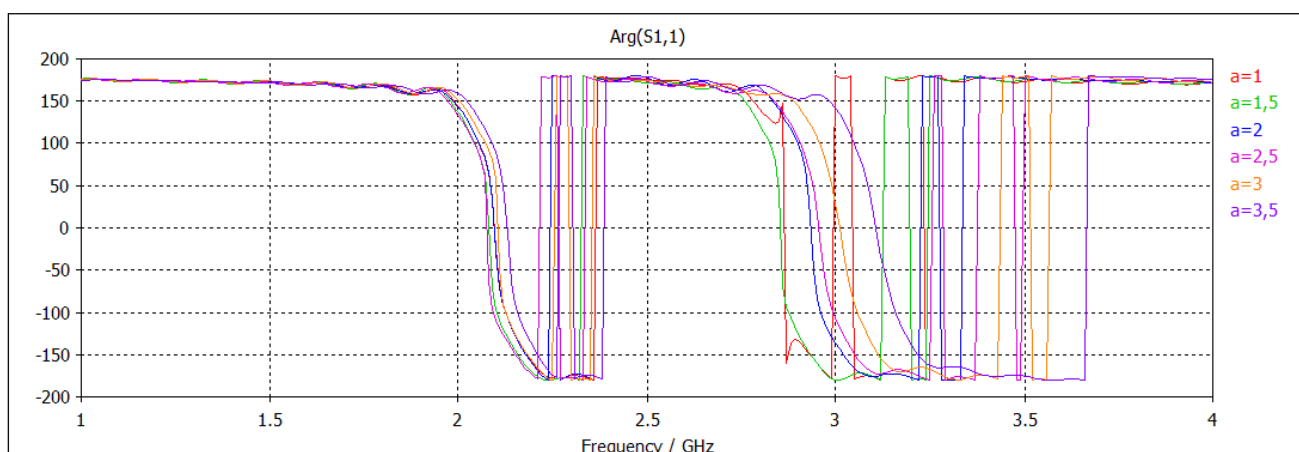


Figura 3.11: Fase de la onda reflejada para distintos valores del ancho del anillo

Ancho anillo (a)	Frec. Resonancia magnética anillo interior
a=1mm	2.86 GHz
a=1.5 mm	2.87 GHz
a=2 mm	2.93 GHz
a=2.5 mm	2.95 GHz
a=3 mm	3.00 GHz
a=3.5 mm	3.10 GHz

Tabla 3.9: Frecuencia de resonancia magnética dependiente del anillo interior para distintos valores del ancho del anillo

Como vemos en la Figura 3.11 al variar el ancho del anillo interior, se produce una variación en la frecuencia a la cual la fase de la onda reflejada se anula, aunque en la imagen no se aprecia muy bien oscila entre 2.8GHz para el ancho menor y 3.1 GHz cuando hemos simulado con 3.5 mm. También es resaltable el hecho de que la frecuencia de resonancia menor no varíe, ya que esta depende exclusivamente del anillo exterior.

3.3.2 Variación permitividad relativa del sustrato

Otro de los parámetros que podemos estudiar, para ver su comportamiento sobre la fase de la onda reflejada, es la permitividad relativa del sustrato sobre el que se apoyan los anillos concéntricos. Hemos estudiado 3 permitividades de materiales comunes así como la permitividad igual a 1 del aire para tomarla como referencia. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.12.

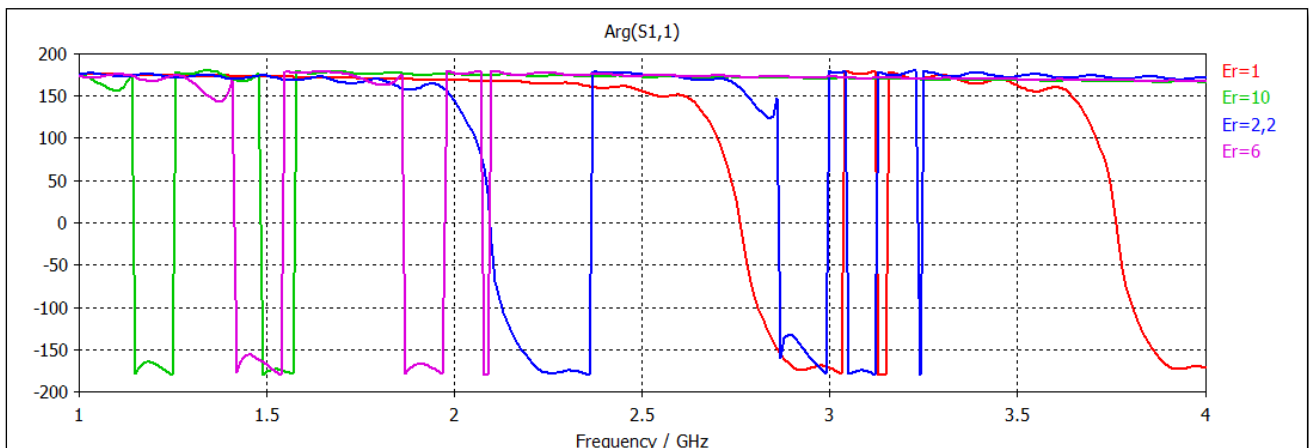


Figura 3.12: Fase de la onda reflejada para distintos valores de permitividad del sustrato

Permitividad relativa (ϵ_r)	Frec. Res. magnética anillo exterior	Frec. Resonancia magnética anillo interior
$\epsilon_r=1$	2.75 GHz	3.76 GHz
$\epsilon_r=2.2$	2.09 GHz	2.86 GHz
$\epsilon_r=6$	1.40 GHz	1.86 GHz
$\epsilon_r=10$	1.14 GHz	1.49 GHz

Tabla 3.10: Frecuencia de resonancia magnética dependientes del anillo interior y exterior para distintos valores de la permitividad relativa del sustrato

Cabe observar la gran variación que sufren los resultados dependiendo del tipo de sustrato con el que trabajemos, reduciéndose bruscamente la frecuencia en la que la fase pasa por 0 según aumentamos la permitividad del sustrato. Nosotros como en el resto del proyecto seguiremos utilizando una permitividad de 2.2.

3.3.3 Conclusiones

A raíz de los resultados obtenidos en la simulación de la celda unidad con dos anillos concéntricos, llegamos a la conclusión de que podemos obtener dos frecuencias de resonancia, y manejarlas por separado dependiendo cada una de ellas de los parámetros de sólo uno de los anillos. En posteriores simulaciones el objetivo será el ver la influencia del plano compuesto de celdas con un anillo simple y con dos anillos concéntricos sobre el dipolo estudiado anteriormente.

3.4 Estructuras con metalización de anillos superpuestos

Otro tipo de metalización que vamos a estudiar es la de dos anillos, pero esta vez uno encima del otro, separados con un sustrato, es decir en una estructura multicapa. La idea es obtener unos resultados muy similares al caso del apartado anterior en el que teníamos dos anillos concéntricos sobre el mismo sustrato. El esquema de la estructura se muestra en la siguiente figura 3.13 y sus dimensiones por defecto en la tabla 3.11. Como hicimos para los casos anteriores, para poder determinar el efecto que se consigue la variación de una dimensión sobre la onda reflejada, mantendremos constantes el resto de parámetros de la estructura.

Características del anillo		
Metalización	Referencia	Valor
	R_ext	15.5 mm
	R_int	14.5 mm
	R_ext_arriba	13 mm
	R_int_arriba	11.5 mm
	h1	1.5 mm
Sustrato	w	16.5 mm
	h	0.78 mm
	Material	Polietileno ($\epsilon_r = 2.2$)

Tabla 3.11: Valores iniciales de la estructura con metalización de dos anillos sobre sustratos diferentes y superpuestos

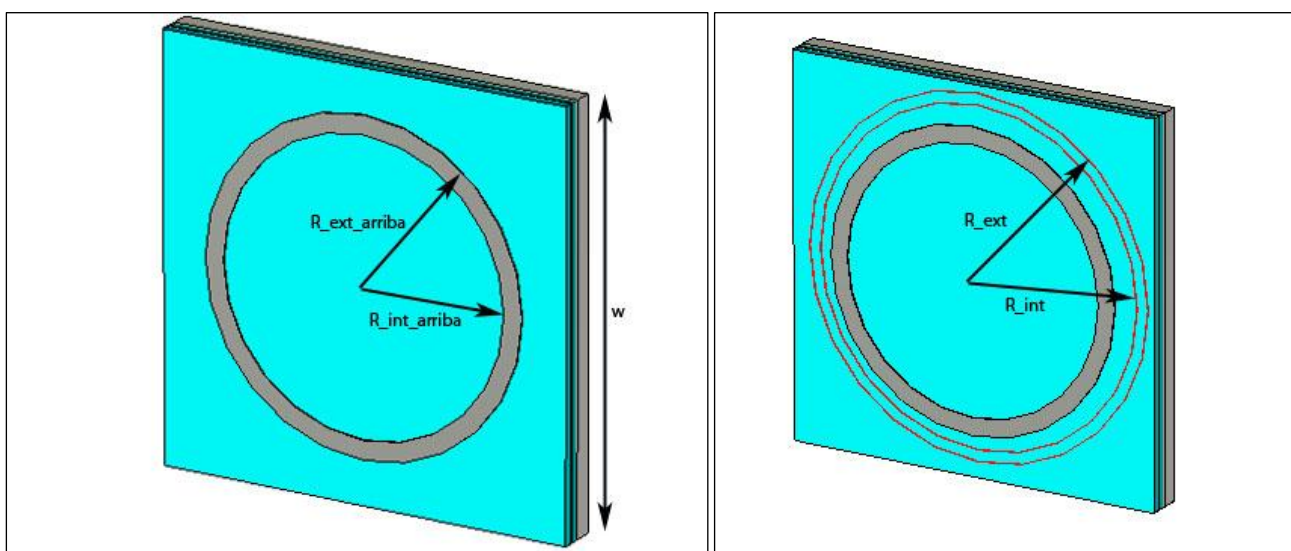


Figura 3.13: Imagen de la celda unidad con dos anillos en diferentes sustratos superpuestos

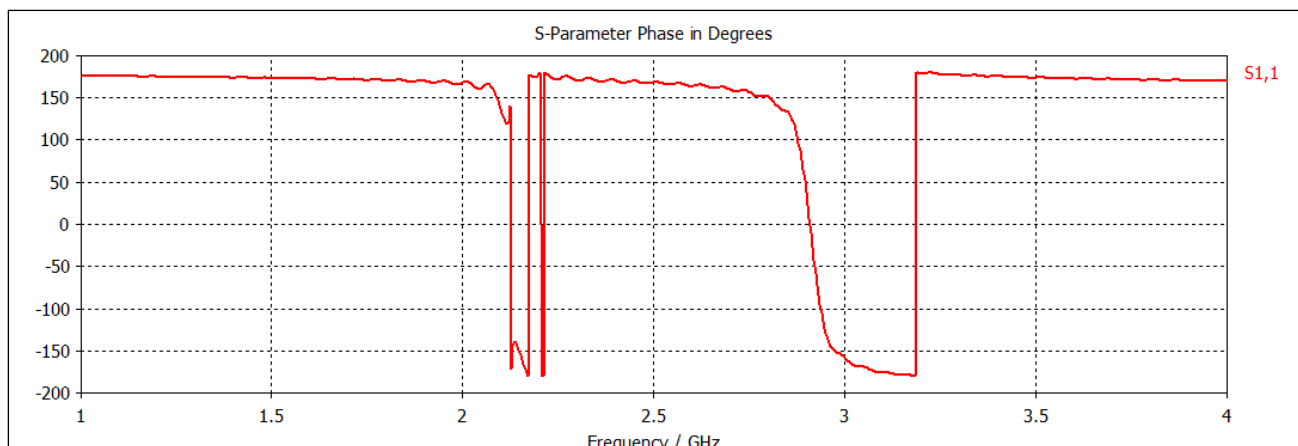


Figura 3.14: Fase de la onda reflejada para los valores por defecto

En la Figura 3.14 se muestran los resultados obtenidos al simular nuestra celda con los valores por defecto que se muestran en la Tabla 3.13. Como se puede observar se obtienen, al igual que en la anterior metalización estudiada, dos frecuencias de resonancia debida a cada uno de los anillos, como veremos en los siguientes apartados.

3.4.1 Variación ancho anillo de arriba

En este apartado variaremos el ancho del anillo que está sobre el sustrato de arriba con el objetivo de ver la influencia sobre la frecuencia de resonancia. Para ello dejaremos fijo el resto de parámetros de la celda, y haremos una parametrización de la variable que hemos denominado como “a”. Hemos tomado unos valores los cuales entendemos como mas lógicos para el ancho de la metalización del anillo, estos valores comprenden entre 1mm y 3mm con pasos de 0.5mm. Los resultados se muestran en la Figura 3.15 y en la Tabla 3.14.

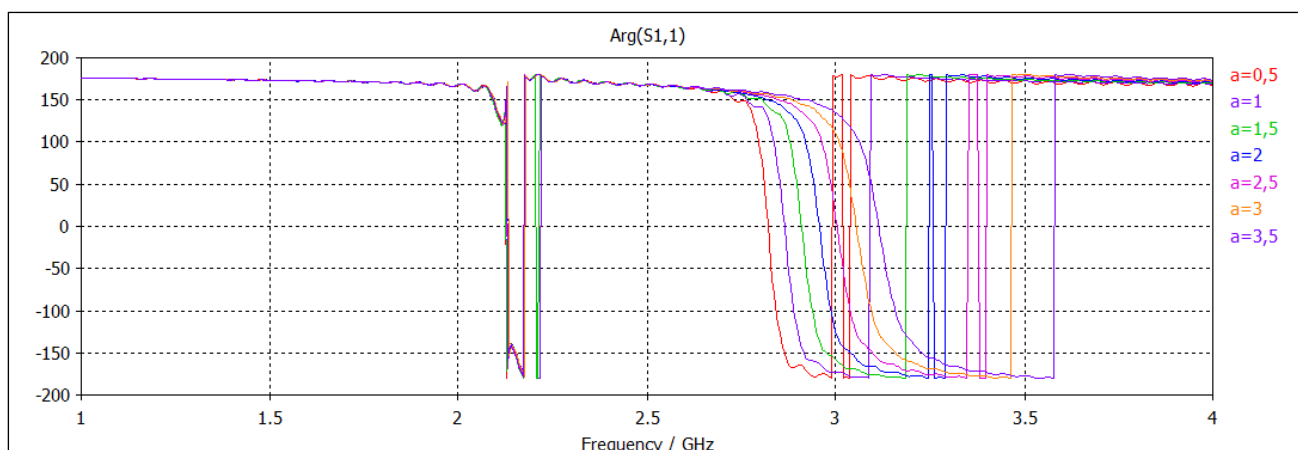


Figura 3.15: Fase de la onda reflejada para distintos valores del ancho del anillo de arriba

Ancho anillo (a)	Frec. Resonancia magnética anillo interior
a=1mm	2.82 GHz
a=1.5 mm	2.86 GHz
a=2 mm	2.95 GHz
a=2.5 mm	3.00 GHz
a=3 mm	3.05 GHz
a=3.5 mm	3.11 GHz

Tabla 3.12: Frecuencia de resonancia magnética dependiente del anillo interior para distintos valores del ancho del anillo de arriba

Como vemos tanto en la Figura 3.15 como en la Tabla 3.14 la variación del ancho del anillo superior solo afecta a una de las frecuencias de resonancia, siendo valores directamente proporcionales ya que como vemos al aumentar el ancho del anillo conseguimos una frecuencia de resonancia mayor, de nuevo como explicamos anteriormente por la disminución del radio intermedio.

3.4.2 Variación de la permitividad relativa del sustrato

Otro de los parámetros que podemos estudiar, para ver su comportamiento sobre la fase de la onda reflejada, es la permitividad relativa de ambos sustratos sobre los que se apoyan ambos anillos. Se ha simulado suponiendo que ambos sustratos son iguales de grosor y con la misma permitividad. Hemos estudiado 3 permitividades de materiales comunes así como la permitividad igual a 1 del aire para tomarla como referencia. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.16.

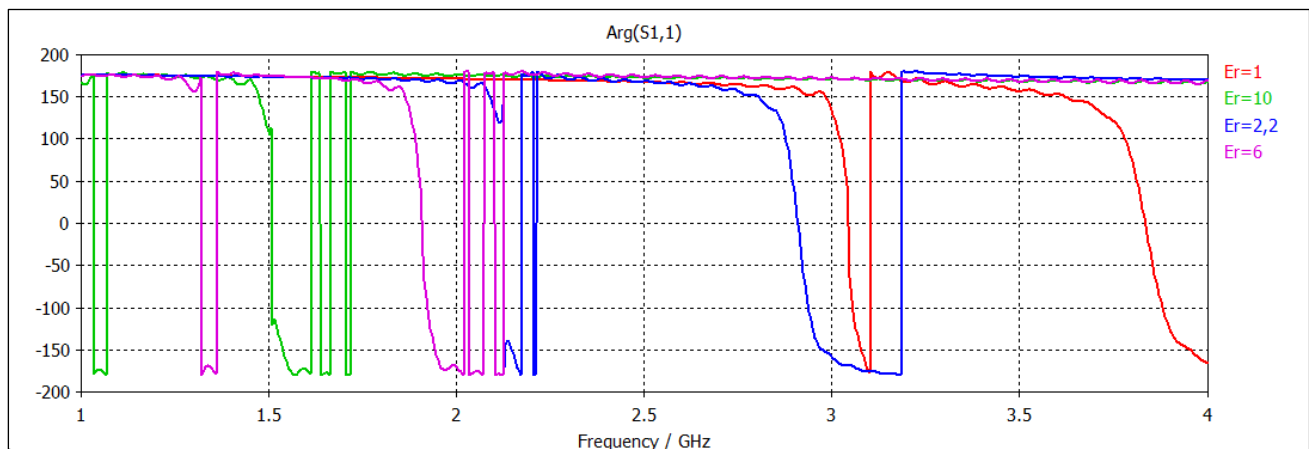


Figura 3.16: Fase de la onda reflejada para distintos valores de permitividad del sustrato

Permitividad relativa (ϵ_r)	Frec. Res. magnética anillo exterior	Frec. Resonancia magnética anillo interior
$\epsilon_r=1$	3.04 GHz	3.84 GHz
$\epsilon_r=2.2$	2.12 GHz	2.91 GHz
$\epsilon_r=6$	1.32 GHz	1.90 GHz
$\epsilon_r=10$	1.03 GHz	1.51 GHz

Tabla 3.13: Frecuencia de resonancia magnética dependientes del anillo superior e inferior para distintos valores de la permitividad relativa del sustrato

Atendiendo al comportamiento de la fase de la onda reflejada tanto para el anillo superior como para el anillo inferior se puede afirmar que a medida que aumenta la permitividad del sustrato, disminuye el valor de frecuencia en que la fase de la onda reflejada es nula. Como ya vimos en otros apartados para otras metalizaciones la permitividad del sustrato influye de una manera muy importante en la configuración del plano de masa, ya que se producen grandes cambios entre las frecuencias de resonancia entre uno y otro material como vemos en la Tabla 3.13.

Capítulo 4.

Conjunto estructuras AMC y dipolo

4.1 Introducción

En el capítulo anterior estudiamos la base para abordar el diseño de planos de masa basados en estructuras periódicas con comportamiento de conductor magnético artificial. Para ello hicimos un estudio paramétrico de celdas unitarias básicas para dos tipos de metalización, con un anillo y con dos anillos concéntricos.

En este capítulo, a partir de las conclusiones obtenidas en los estudios previos, se diseñarán los planos de masa artificiales implementados con estructuras periódicas para las diferentes metalizaciones estudiadas, todos ellos con la frecuencia de trabajo de 2GHz.

Para ver estos resultados lo que se pretende es aplicar el resultado obtenido al diseño del dipolo que también estudiamos en anteriores capítulos y ver la influencia que tiene el plano de masa artificial sobre el mismo.

La justificación del uso de estos planos AMC o artificiales es que si colocásemos un plano de masa metálico convencional (PEC), a la una altura pequeña para que pueda considerarse una antena de bajo perfil (posteriormente hemos considerado entre 5mm y 15mm), las ondas reflejadas del dipolo sufren una inversión de fase, que puede resultar en una interferencia destructiva entre las ondas incidente y reflejada. O lo que es lo mismo las corrientes imagen anulan a las corrientes de la antena, lo cual implica una pérdida considerable de la eficiencia de radiación del dipolo.

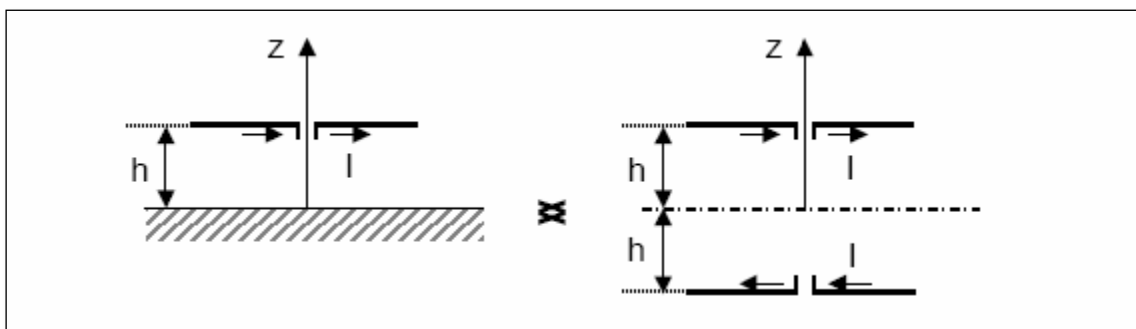


Figura 4.1: Esquema representativo de la teoría de las imágenes para el dipolo

Este problema tendría solución si colocásemos el dipolo a una altura de $\lambda/4$ respecto del plano metálico, puesto que en ese caso, el desfase producido en el camino desde la antena hasta el plano y de vuelta a la antena, completa un ciclo, y por tanto no se anulan las corrientes. Sin embargo para la frecuencia de 2GHz a la que trabajamos, una altura de $\lambda/4$ equivaldría a 37.5 mm por lo que ya no podríamos considerar una antena de bajo perfil. El mismo inconveniente encontraríamos si colocásemos la antena de forma perpendicular al plano, es decir conseguiríamos que las corrientes no se anulasen, pero el conjunto de dipolo mas plano sería demasiado grande.

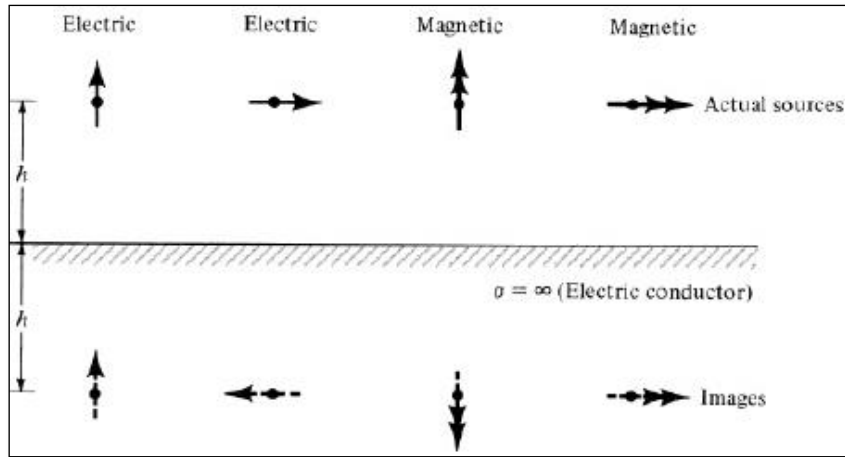


Figura 4.2: Imagen de la corriente emitida por una antena en diferentes posiciones respecto al plano

La solución por tanto es colocar un plano de masa artificial, ya que este como explicamos anteriormente refleja las ondas en fase a la frecuencia de funcionamiento. Por tanto las corrientes imágenes no se anularán y el dipolo radiará de forma correcta.

4.2 Caracterización del conjunto dipolo-plano de masa con metalización de anillo simple

Una vez estudiados por separado tanto el dipolo como la celda unidad para un plano con metalización de un anillo simple, el siguiente paso será el de la simulación conjunta.

Para caracterizar la estructura se estudiará el nivel de adaptación del dipolo. El esquema del conjunto se muestra en la Figura 4.1:

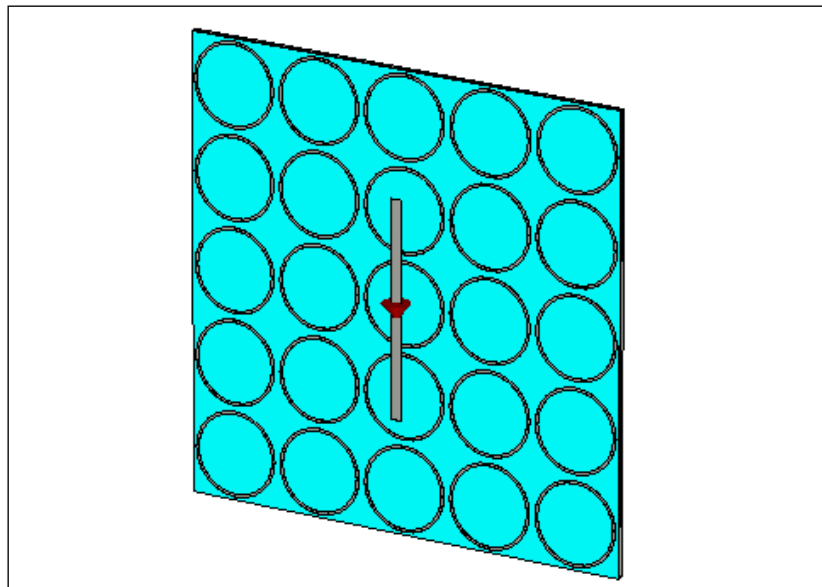


Figura 4.3: Conjunto dipolo-plano de masa con metalización de anillo simple

La Tabla 4.1 muestra la información correspondiente a la celda unidad definitiva que se utilizará para implementar el plano de masa con la metalización de un solo anillo. A la hora de elegir el número de celdas del plano hemos tenido en cuenta el tiempo de simulación y hemos decidido que el número total de periodos del plano sea 5, ello unido a la separación entre anillos, hace que las dimensiones del plano sean de 160×160 mm, es decir $0.93\lambda \times 0.93\lambda$ aproximadamente. Elegimos un número impar para que el dipolo quede centrado en la superficie.

Características de la estructura		
Metalización	Referencia	Valor
	Radio externo	15 mm
	Radio interno	14 mm
	Anchura del anillo	1 mm
	Espesor anillo	0.1 mm
	Separación entre anillos	2 mm
Sustrato	Ancho celda unidad	32 mm
	Espesor	1.78 mm
	Material	Polietileno ($\epsilon_r = 2.2$)
Plano de masa	Espesor	1.5 mm
	Material	Aluminio
Dipolo	Longitud	75 mm
	Ancho brazo	4 mm
	Espesor	0.1 mm

Tabla 4.1: Conjunto dipolo-plano de masa con metalización en anillo

4.2.1 Cálculo del tamaño y altura del dipolo

En este siguiente apartado, determinaremos el tamaño que debe tener el dipolo y a la altura que debe colocarse respecto al plano de masa para que el nivel de adaptación sea el mejor posible. Para ello, vamos a hacer un barrido de longitudes del dipolo entre unos valores lógicos entre 20mm y 30mm (0.75λ y 0.5λ) para varias distancias al plano de masa. Hemos considerado unas alturas entre 5mm ($\lambda/30$) y 15mm ($\lambda/10$), cuyo límite superior hemos considerado que es lo suficientemente pequeña para que la antena siga siendo de bajo perfil y el límite inferior lo suficientemente grande para evitar que su fabricación en el laboratorio no sea demasiado dificultosa.

El dipolo lo hemos colocado en el centro de la estructura paralelo a la misma tal y como se muestra en la Figura 4.3, aunque realmente dada la simetría de las metalizaciones el sentido en el cual coloquemos el dipolo es indiferente.

Por tanto en las siguientes figuras mostramos el barrido de tamaño del dipolo para alturas entre 5mm($\lambda/30$) y 15mm ($\lambda/10$) en pasos de 1mm.

- Altura $h=5\text{mm}$

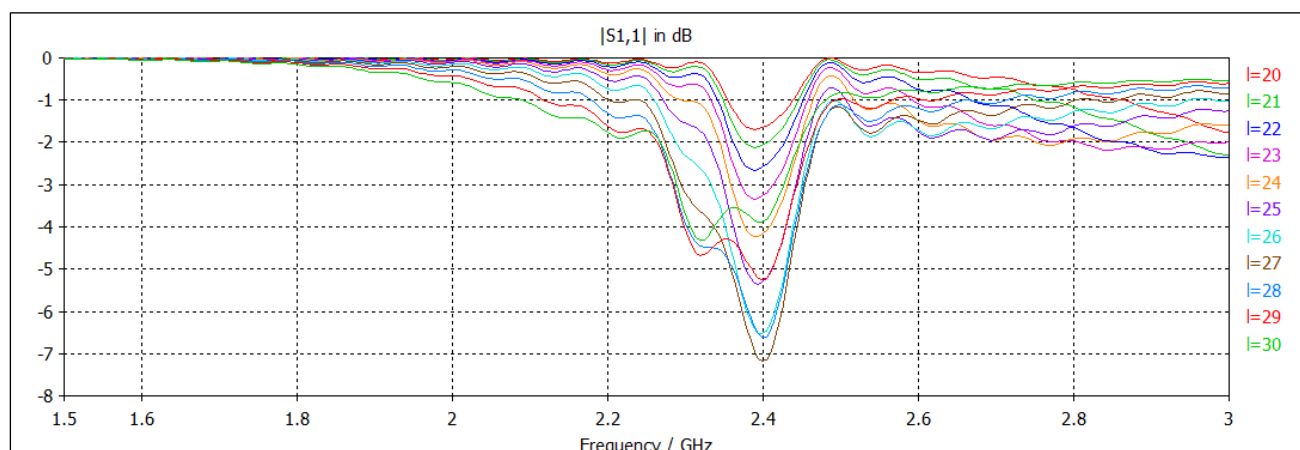


Figura 4.4: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 5mm

- Altura $h=6\text{mm}$

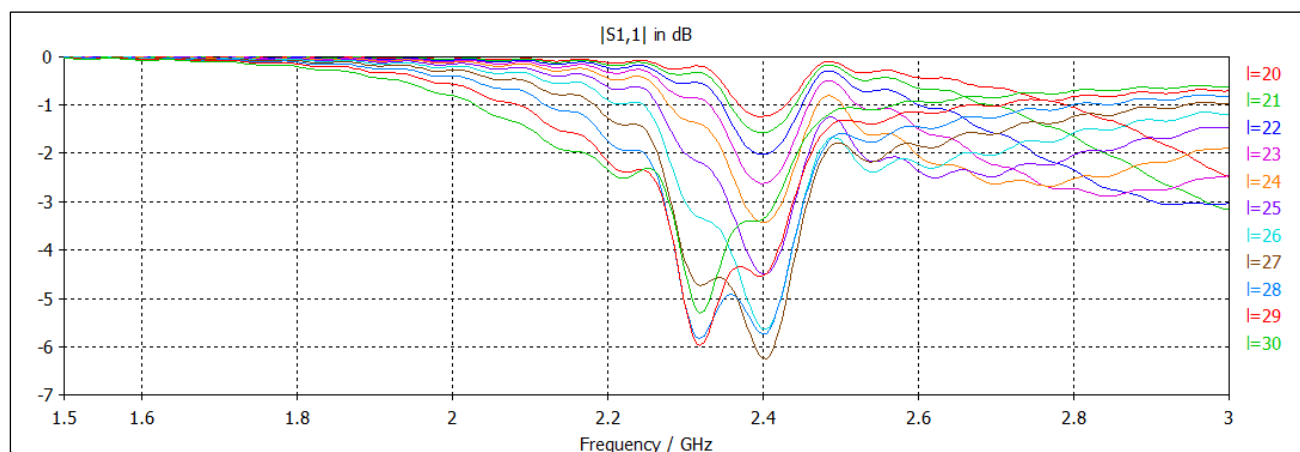


Figura 4.5: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 6mm

- Altura $h=7\text{mm}$

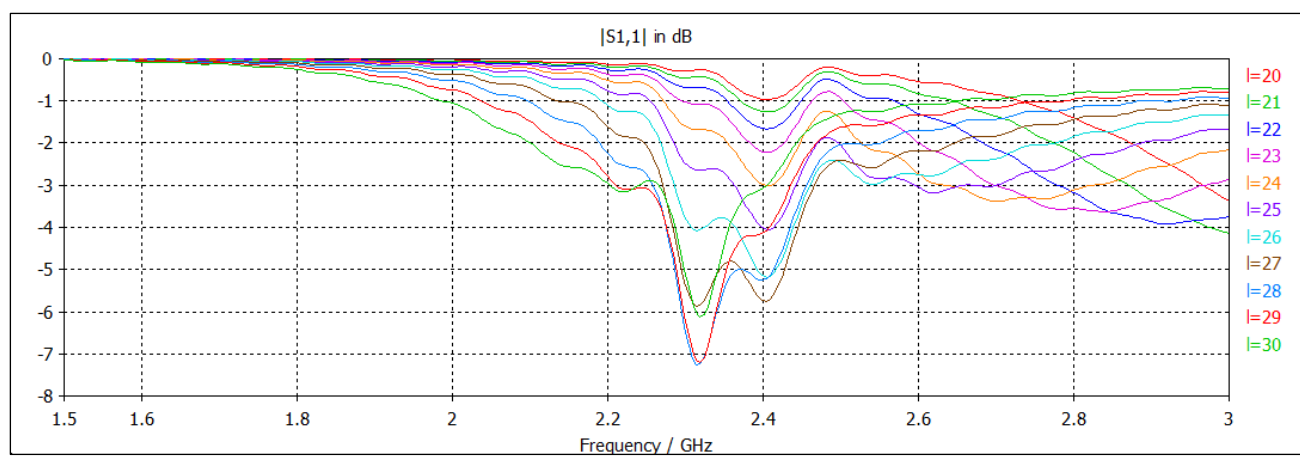


Figura 4.6: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 7mm

- Altura $h=8\text{mm}$

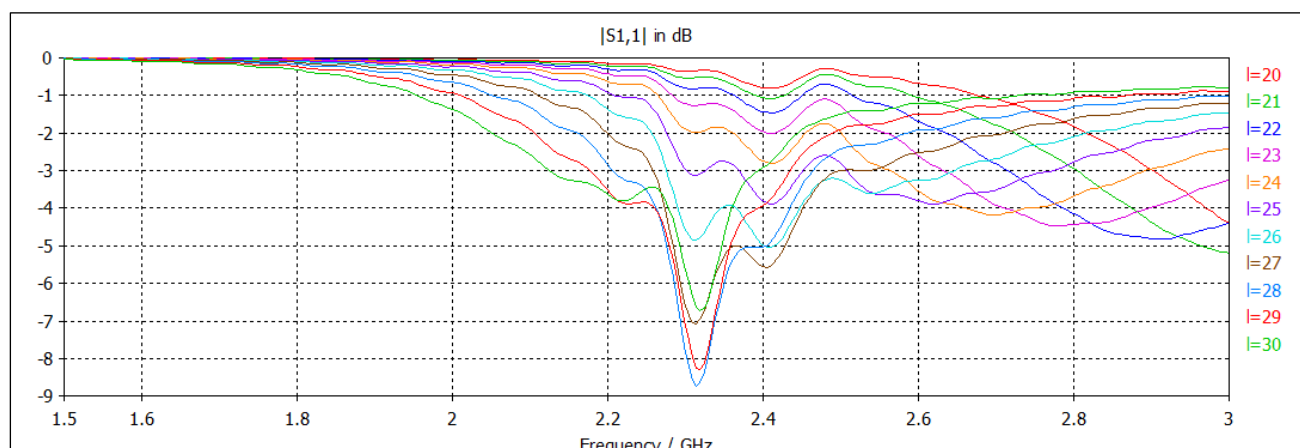


Figura 4.7: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 8mm

- Altura $h=9\text{mm}$

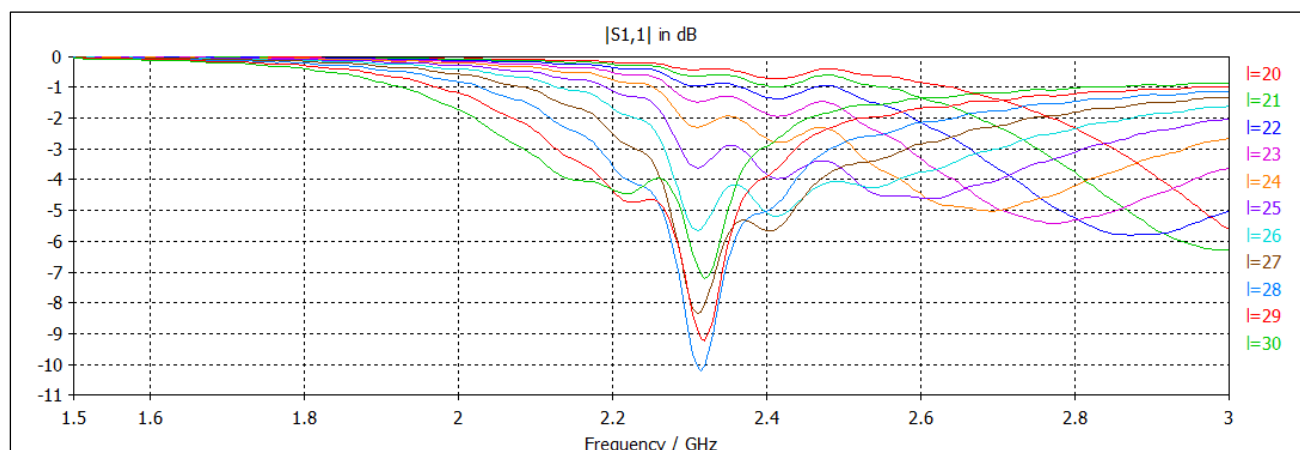


Figura 4.8: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 9mm

- Altura $h=10\text{mm}$

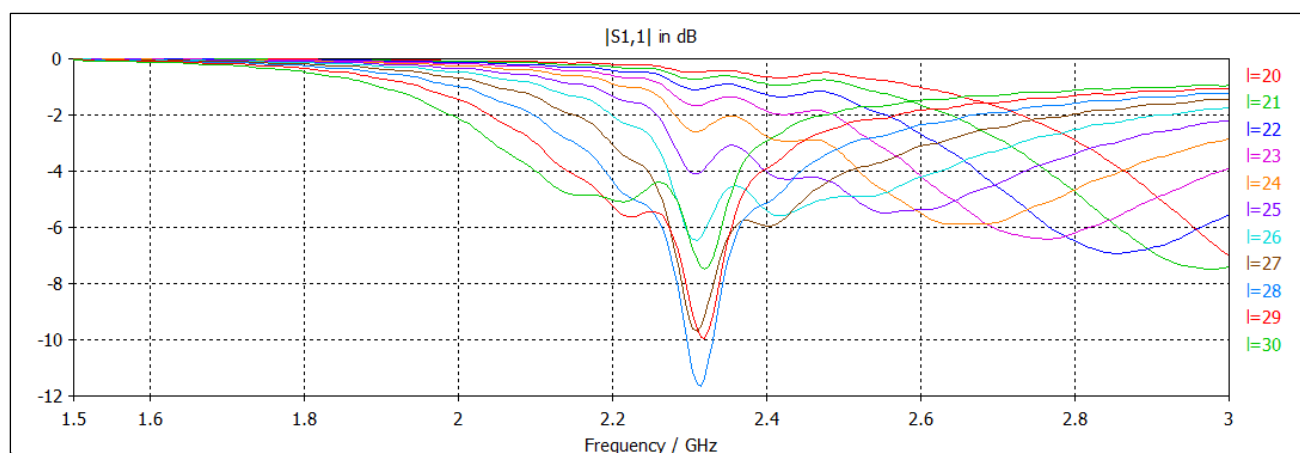


Figura 4.9: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 10mm

- Altura $h=11\text{mm}$

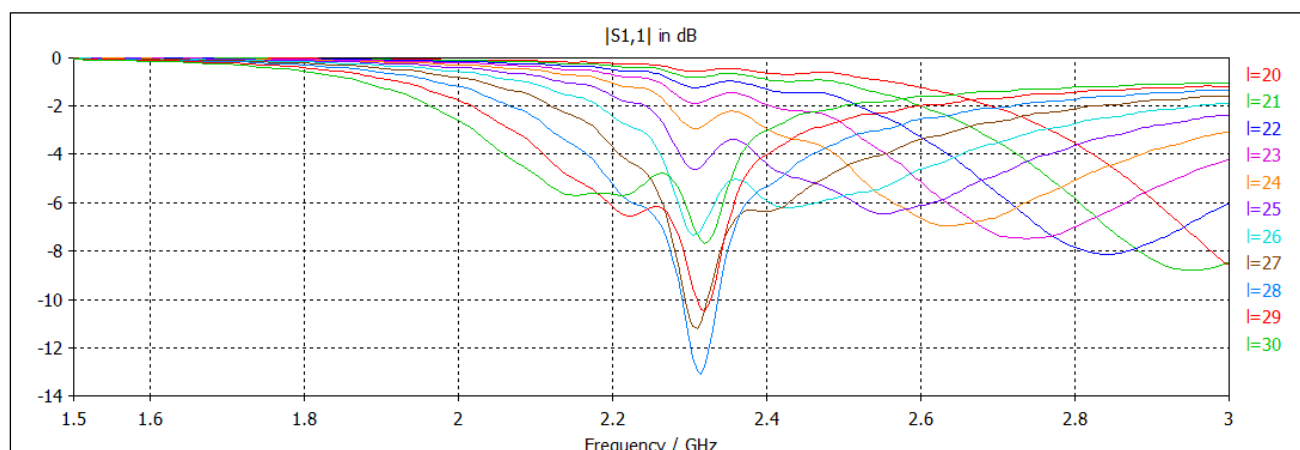


Figura 4.10: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 11mm

- Altura $h=12\text{mm}$

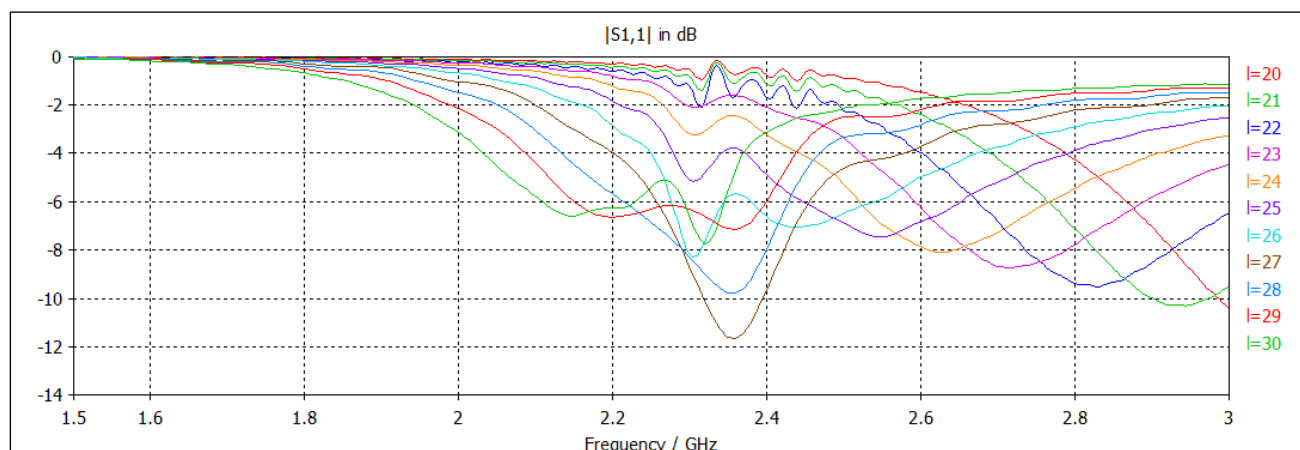


Figura 4.11: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 12mm

- Altura $h=13\text{mm}$

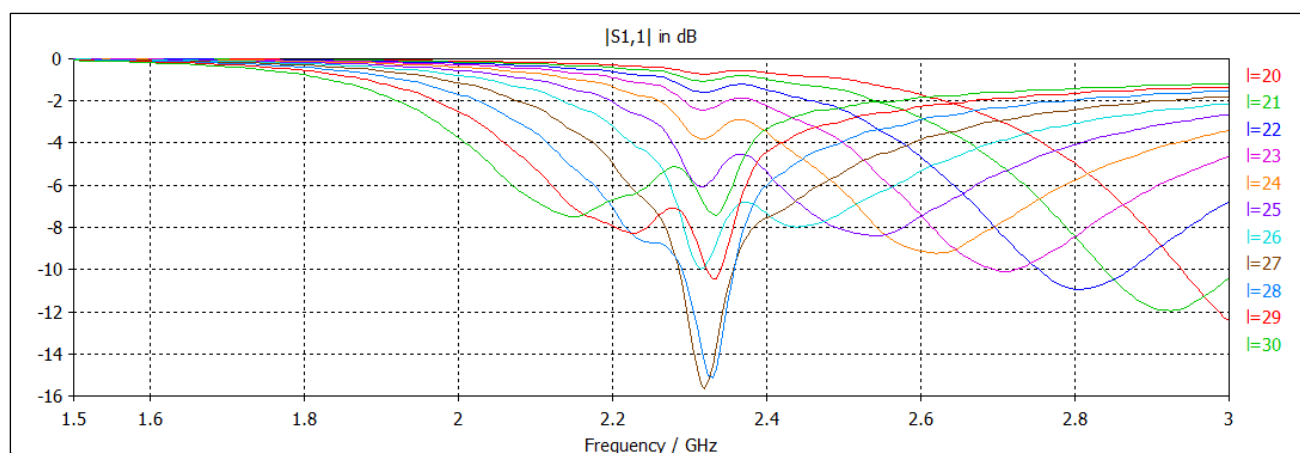


Figura 4.12: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 13mm

- Altura $h=14\text{mm}$

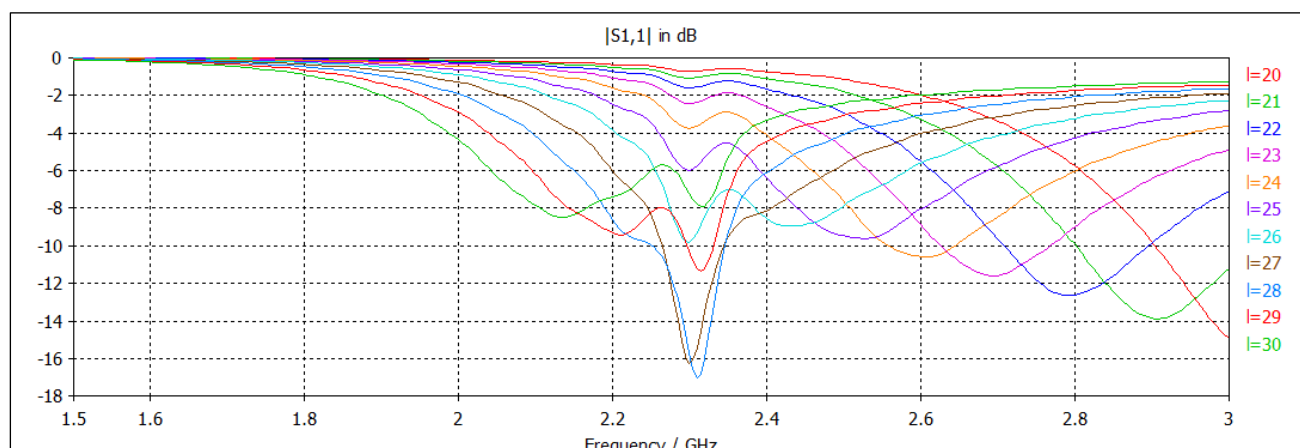


Figura 4.13: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 14mm

- Altura $h=15\text{mm}$

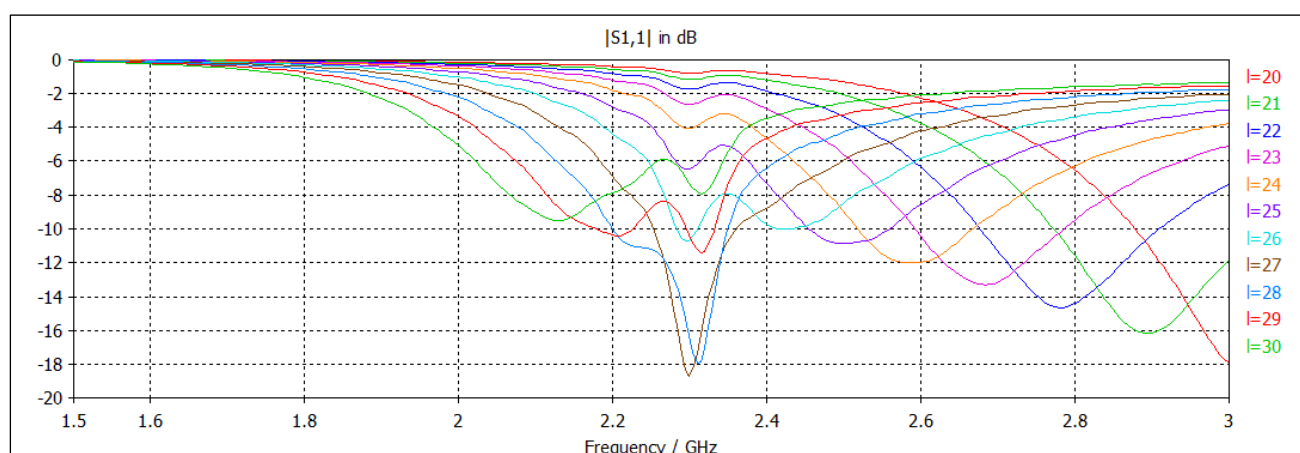


Figura 4.14: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 15mm

Analizando las figuras vemos que las longitudes del dipolo para los cuales presentan mejores resultados de adaptación son $l=27\text{mm}$ y $l=28\text{mm}$, que equivalen solo a una de las mitades del dipolo por lo que el tamaño del dipolo completo sería $l=54\text{mm}=0.36\lambda$ y $l=56\text{mm}=0.37\lambda$. Como los resultados obtenidos son bastante parecidos vamos a quedarnos con el tamaño menor, es decir, $l=0.36\lambda$.

Como vimos en anteriores capítulos en los que estudiamos el comportamiento del dipolo, cabría esperar que los mejores niveles de adaptación se diesen para un tamaño de dipolo de $\lambda/2$, sin embargo la razón por lo que esto ocurre es que la presencia del plano artificial afecta directamente al comportamiento del dipolo, por lo que resulta imposible estudiar antena y plano por separado, ya que darían lugar a resultados erróneos. En posteriores apartados haremos una comparación entre cómo afecta a la adaptación de la antena la presencia del plano artificial o de un plano conductor. Como podemos observar en las figuras anteriores, para alturas a partir de 9mm empezamos a encontrar longitudes del dipolo para las cuales podemos considerar a la antena como adaptada ($|S_{11}| < -10\text{dB}$). Por tanto la altura óptima estará entre 9 mm y 15 mm, en la siguiente figura recogemos en una sola gráfica los niveles de adaptación para la longitud de $l=27\text{mm}$ elegida anteriormente.

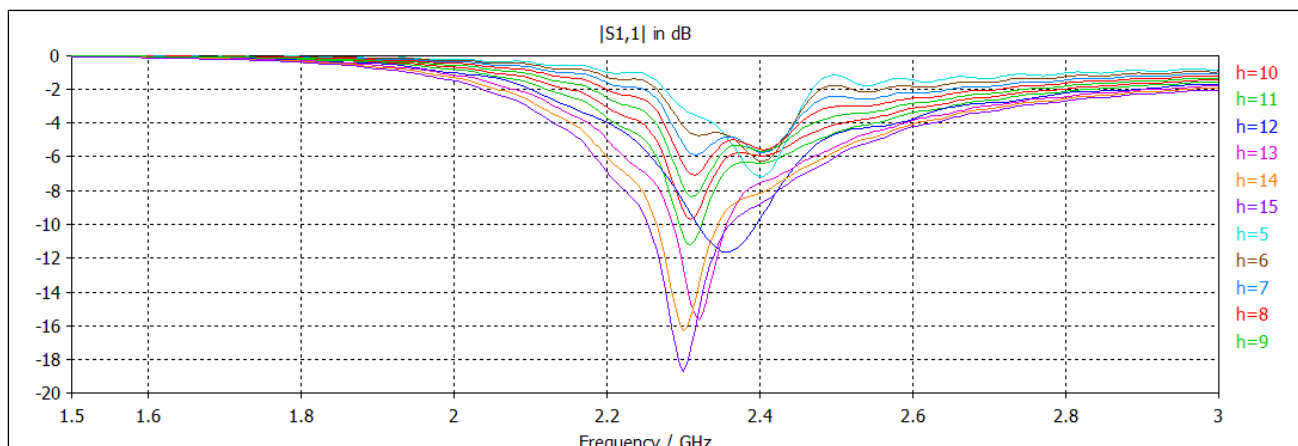


Figura 4.15: Nivel de adaptación para diferentes alturas para una longitud fija del dipolo de $l=27\text{mm}$

Altura respecto PEC(h)	Frec. Resonancia magnética	Nivel de adaptación	Ancho de banda
h=5mm	2.4 GHz	-7.17dB	-
h=6mm	2.4GHz	-6.4 dB	-
h=7mm	2.31 GHz	-5.87 dB	-
h=8mm	2.31 GHz	-7.34 dB	-
h=9mm	2.31 GHz	-8.34 dB	-
h=10mm	2.31 GHz	-9.68 dB	-
h=11mm	2.31 GHz	-11.11 dB	29.70 MHz
h=12mm	2.35 GHz	-11.72 dB	77.18 MHz
h=13mm	2.32 GHz	-15.5 dB	70.42 MHz
h=14mm	2.30 GHz	-16 dB	80.62 MHz
h=15mm	2.30 GHz	-18.59 dB	105.85 MHz

Tabla 4.2: Nivel de adaptación y frecuencia de resonancia para diferentes alturas para una longitud fija del dipolo de $l=27\text{mm}$

Como vemos según aumenta la altura conseguimos mejores resultados y es a partir de $h=10\text{mm}$ cuando se acerca a -10dB y por tanto la antena se considera adaptada. Sin embargo al ser un resultado muy ajustado, hemos optado por elegir una altura de 13mm que tiene buenos resultados de adaptación. Podríamos habernos decantado por una altura mayor pero consideramos buenos los resultados de $h=13\text{mm}$ y además conseguimos que conjunto tenga un perfil un poco más bajo que si eligiésemos la altura de 15mm que es la que mejor nivel de adaptación tiene.

4.2.2 Nivel de adaptación

En los anteriores apartados del estudio del dipolo hemos calculado el tamaño y la altura óptimos de mismo para maximizar la adaptación. Ahora, se pretende analizar cuál es el nivel de adaptación de dipolo bajo estudio cuando se encuentra sobre un plano de masa metálico y sobre el vacío para compararlo con los resultados obtenidos.

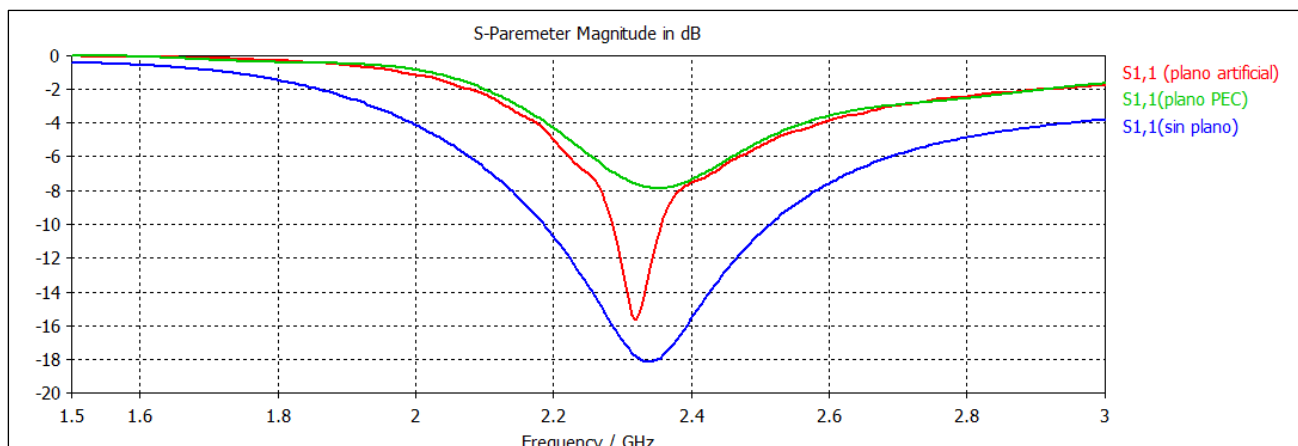


Figura 4.16: Nivel de adaptación del dipolo de tamaño 0.36λ colocado a 13mm sobre el plano de masa con metalización en anillo

Atendiendo a los resultados mostrados en la figura anterior se puede observar que cuando el dipolo se encuentra sobre un plano metálico (PEC), debido a la teoría de las imágenes que explicamos anteriormente no se adapta, ya que las corrientes del dipolo se interfieren entre ellas. Por el contrario, cuando se tiene un dipolo en el vacío, se obtiene una adaptación mucho mayor. Aunque esto pueda parecer muy beneficioso, hay que pensar que existen muchas situaciones en las que es obligatorio considerar la existencia de un plano de masa debajo de la antena, como el caso de cuando queremos colocar una antena sobre alguna superficie. También hay que decir que aunque son menores, los resultados de nivel de adaptación con el plano artificial son bastante buenos, acercándose a los obtenidos cuando la antena no tiene plano de masa.

4.2.3 Diagrama de radiación

En este apartado, vamos a ver y estudiar las características del diagrama de radiación de nuestro conjunto dipolo-plano de masa, ya que es indispensable que aparte de tener una buena adaptación, presente buenos resultados en este diagrama para afirmar que el plano de masa con metalización en anillo es adecuado como plano de masa para nuestro dipolo.

En este caso estudiaremos la distribución de campo eléctrico en la superficie y el interior del plano y el diagrama de campo lejano.

En la Figura 4.17 se muestra el diagrama de radiación de nuestro conjunto en 3 dimensiones. Aunque apenas aporta información cuantitativa, sí que resulta útil para tener una idea general de las características de radiación del conjunto. Como se puede observar este diagrama presenta un máximo en la dirección perpendicular a la antena, o lo que es lo mismo en la dirección broadside y además a simple vista podemos observar la inexistencia de lóbulos secundarios y que no existe radiación trasera, aunque en las siguientes figuras podremos verlo más claramente.

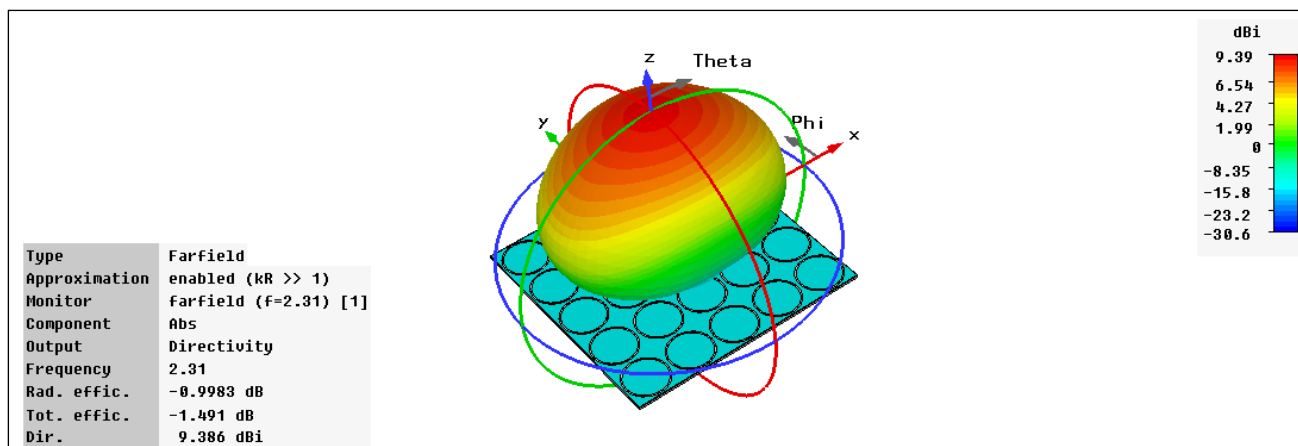


Figura 4.17: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.36λ colocado a 13 mm sobre el plano de masa con metalización en anillo

En la figura 4.18 mostramos las representaciones correspondientes al diagrama de radiación en coordenadas polares para los ángulos $\Phi=0^\circ$ y $\Phi=90^\circ$. Se puede observar un lóbulo principal bien definido, aunque existirá una mínima pérdida de energía debido a la radiación trasera que se observa.

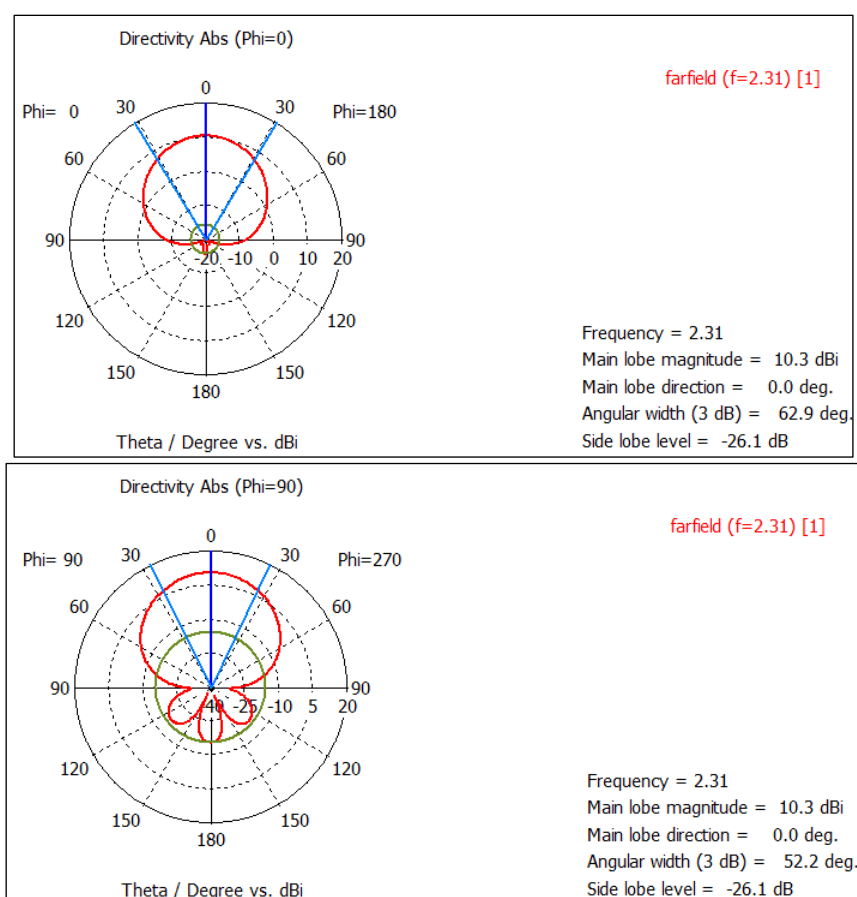


Figura 4.18: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.36λ colocado a 13 mm sobre el plano de masa con metalización en anillo

4.2.4 Distribución campo eléctrico

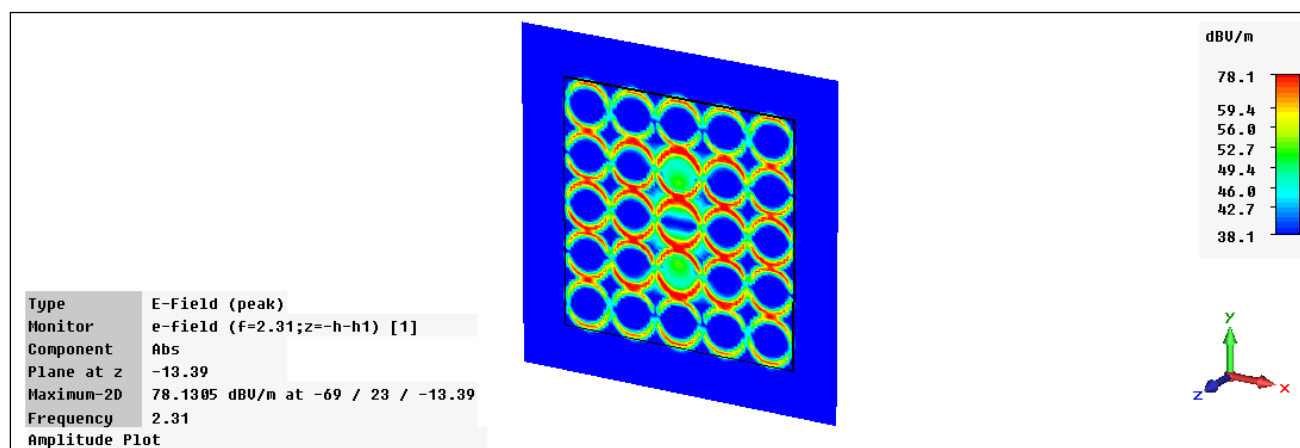


Figura 4.19: Diagrama de campo E generado por un dipolo de tamaño 0.36λ colocado a 13 mm sobre el plano de masa con metalización en anillo

La Figura 4.19 muestra la distribución de campo eléctrico en la superficie del plano de masa. El comportamiento que se observa es que el campo presenta su máxima amplitud en las zonas centrales donde se encuentra el dipolo, siendo la intensidad mínima en los extremos del plano. Por tanto se puede deducir que los elementos centrales serán los principales responsables del comportamiento general del diseño, y que si cambiásemos el diseño los cambios deberían de realizarse sobre los elementos más exteriores.

4.3 Caracterización del conjunto dipolo-plano de masa con metalización de dos anillos concéntricos

En este siguiente apartado vamos a estudiar igualmente la influencia que tiene sobre la radiación del dipolo nuestro plano de masa artificial, pero en este caso con el otro tipo de metalización estudiado en el capítulo anterior, es decir, el de dos anillos concéntricos. El objetivo en este apartado es observar si la antena se adapta a las dos frecuencias de resonancia debidas a cada uno de los anillos, como vimos en el capítulo anterior. El esquema de nuestro conjunto dipolo-plano es el siguiente:

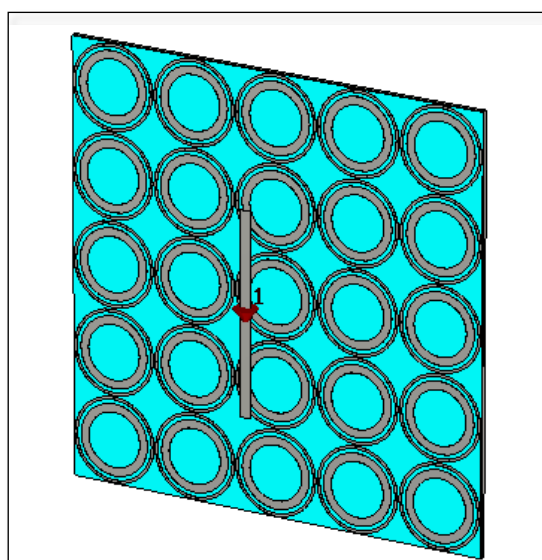


Figura 4.20: Conjunto dipolo-plano de masa con metalización de 2 anillos concéntricos

La Tabla 4.2 muestra la información correspondiente a la celda unidad definitiva que se utilizará para implementar el plano de masa con la metalización de dos anillos. Para las longitudes radiales de los anillos hemos utilizado las que daban mejores resultados cuando estudiamos una celda por separado en el anterior capítulo. A la hora de elegir el número de celdas del plano hemos considerado la misma que para el anterior estudio con una metalización de un solo anillo, es decir un total de 5 periodos que junto con la separación entre anillos hacia unas dimensiones del plano de 160x160 mm.

Características de la estructura		
Metalización anillo exterior	Referencia	Valor
	Radio externo	15.5 mm
	Radio interno	14.5 mm
	Anchura del anillo	1 mm
	Espesor anillo	0.1 mm
	Separación entre anillos	2 mm
Metalización anillo interior	Radio externo	13 mm
	Radio interno	11.5 mm
	Anchura del anillo	1.5 mm
	Espesor anillo	0.1 mm
	Separación entre anillos	2 mm
Sustrato	Ancho celda unidad	32 mm
	Espesor	1.78 mm
	Material	Polietileno ($\epsilon_r = 2.2$)
Plano de masa	Espesor	1.5 mm
	Material	Aluminio
Dipolo	Longitud	75 mm
	Ancho brazo	4 mm
	Espesor	0.1 mm

Tabla 4.3: Conjunto dipolo-plano de masa con metalización de dos anillos concéntricos

4.3.1 Calculo del tamaño y altura del dipolo

En este apartado, operaremos de la misma forma que en la anterior metalización para determinar el tamaño que deber tener el dipolo y la altura que debe haber respecto al plano de masa para que el nivel de adaptación sea el mejor posible. Para ello, haremos un barrido de longitudes del dipolo entre los valores que consideramos más lógicos, es decir, entre 20mm y 30mm. Las alturas que hemos tenido en cuenta en este caso son un rango menor que la anterior metalización ya que como vimos es sólo a partir de 10mm cuando se obtienen resultados aceptables. En este caso hemos considerado alturas entre 10mm ($\lambda_{2\text{GHz}}/15$) y 15mm ($\lambda_{2\text{GHz}}/10$). El dipolo lo hemos colocado en el centro de la estructura paralelo a la misma igual que antes, cabe destacar que dada la simetría de las metalizaciones el sentido en el cual coloquemos el dipolo es indiferente.

Por tanto en las siguientes figuras mostramos el barrido de tamaño del dipolo para alturas entre 10mm y 15mm en pasos de 1mm. En ellas el objetivo es buscar a qué altura y para qué tamaño del dipolo conseguimos una mejor adaptación en las dos frecuencias de resonancia en las que vimos en el anterior capítulo que conseguíamos se anulase la fase en el estudio de la celda unitaria.

- $h=10\text{mm}$

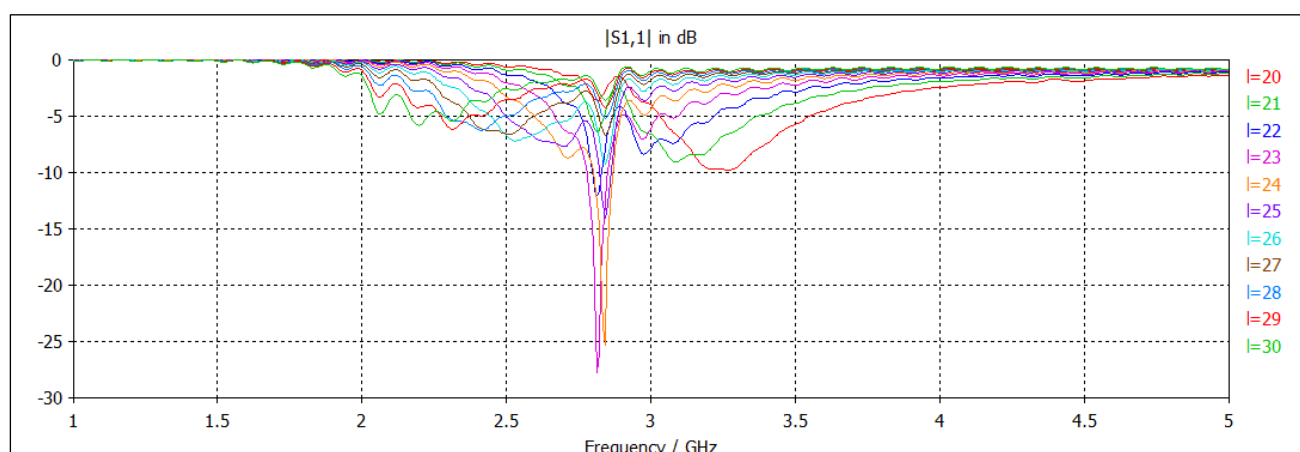


Figura 4.21: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 10mm

- $h=11\text{mm}$

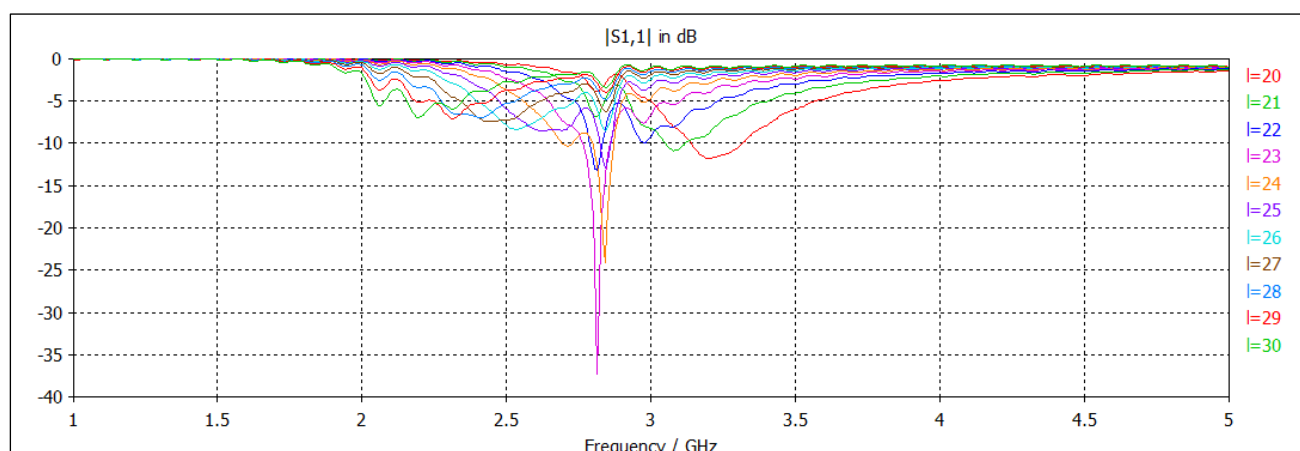


Figura 4.22: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 11mm

- $h=12\text{mm}$

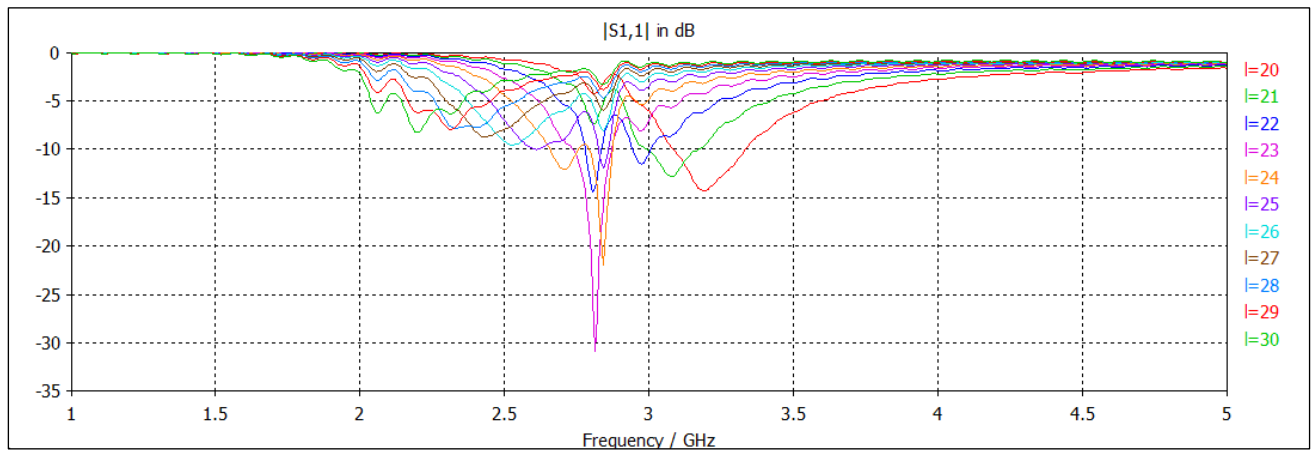


Figura 4.23: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 12mm

- $h=13\text{mm}$

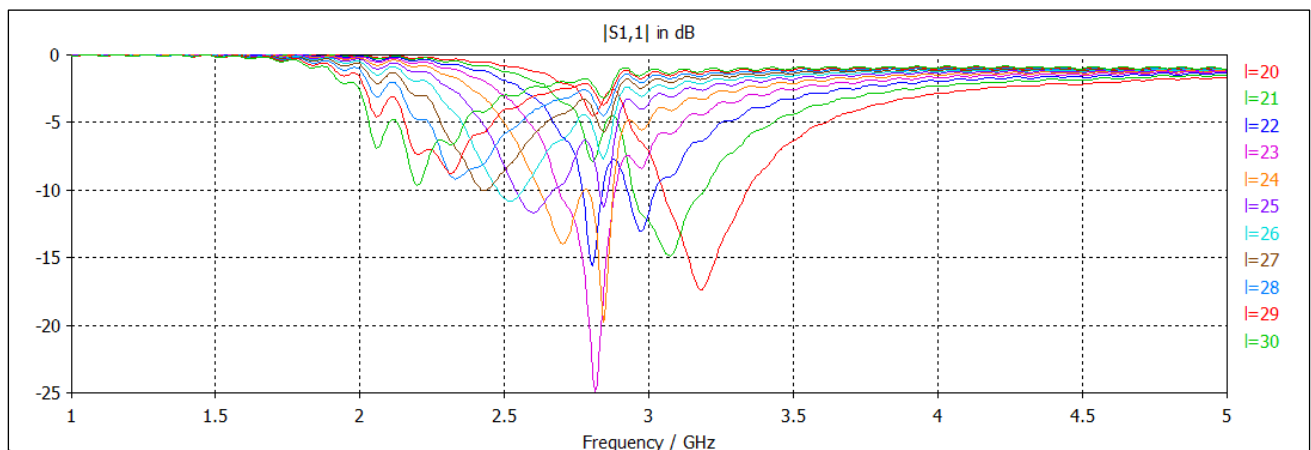


Figura 4.24: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 13mm

- $h=14\text{mm}$

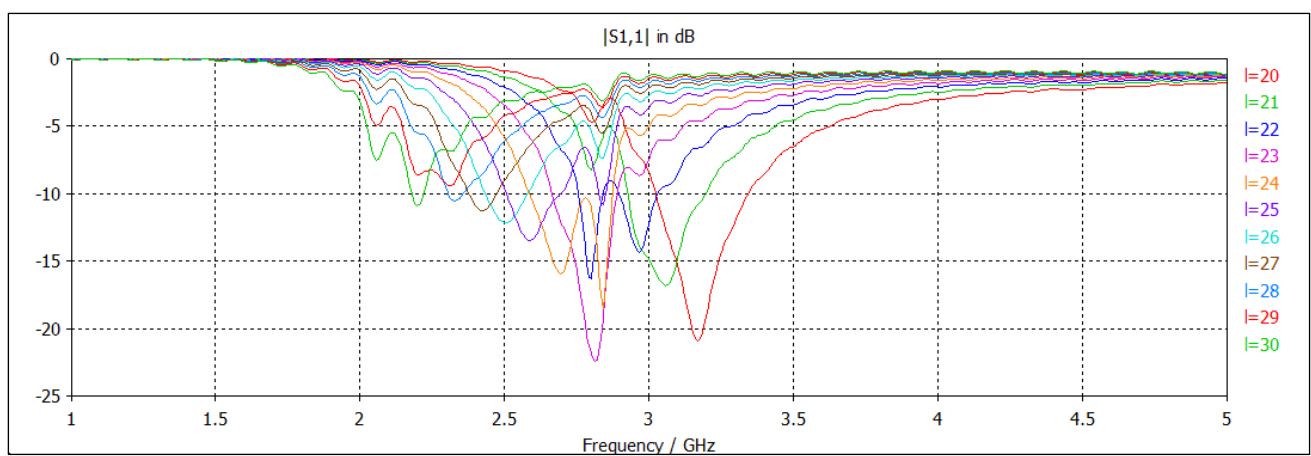


Figura 4.25: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 14mm

- $h=15\text{mm}$

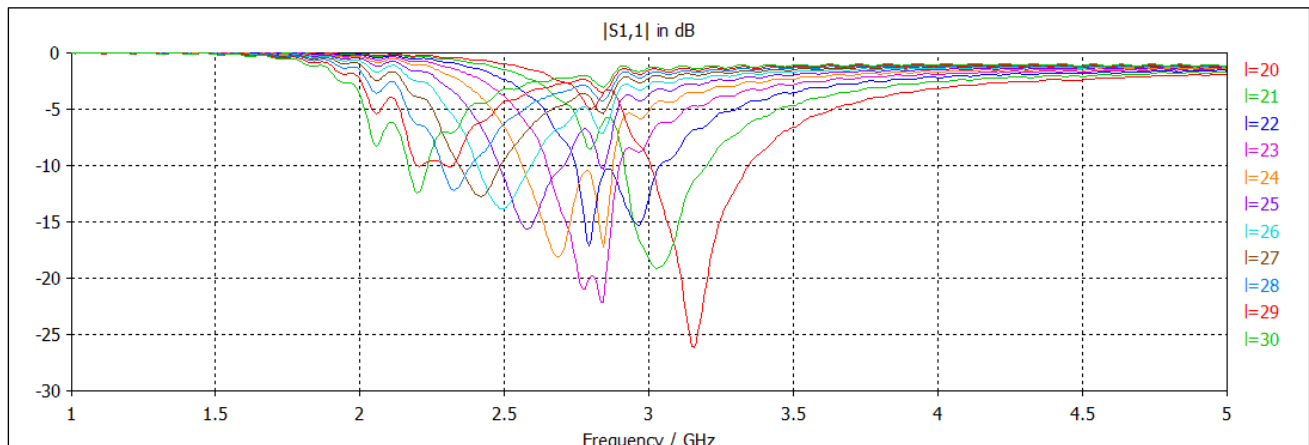


Figura 4.26: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 15mm

De las anteriores figuras podemos observar que es a partir de una altura de 12mm cuando conseguimos que la antena presente buenos resultados de adaptación para las dos frecuencias de resonancia. Estos resultados suelen conseguirse para longitudes del dipolo entre 22mm y 25 mm generalmente. Como explicamos en el estudio de la anterior metalización, estas longitudes corresponden a la mitad del dipolo, por lo que la longitud del dipolo completo entre las que buscaríamos la óptima sería entre 44mm (0.29λ) y 50mm (0.33λ). Una longitud relativamente más pequeña que para el dipolo en la metalización con un solo anillo.

Viendo los resultados hemos decidido decantarnos por la longitud para el dipolo de 48mm ($l=24\text{mm}$), que equivale a 0.32λ . Hemos elegido este tamaño porque presenta mejores resultados de adaptación para los dos picos de frecuencia.

En la Figura 4.26 mostramos los resultados de este tamaño para las diferentes alturas, para así ver mejor los resultados y poder elegir la altura óptima a la que debemos colocar el dipolo respecto al plano de masa.

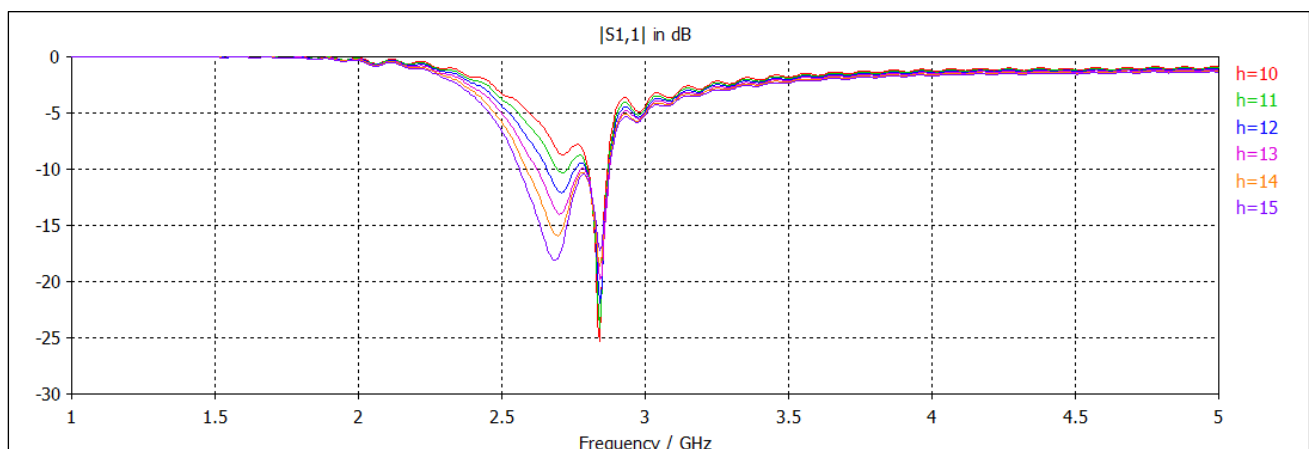


Figura 4.27: Nivel de adaptación para diferentes alturas para una longitud fija del dipolo de $l=24\text{mm}$

Altura respecto PEC(h)	Frec. Res. magnética menor	Nivel de adaptación	Frec. Res. magnética mayor	Nivel de adaptación	Ancho de banda
h=10mm	2.70 GHz	-8.74 dB	2.84GHz	-25.27dB	68.3 MHz
h=11mm	2.71 GHz	-10.36 dB	2.84 GHz	-24.11 dB	178.9 MHz
h=12mm	2.70 GHz	-12.13 dB	2.84 GHz	-21.87 dB	217.2 MHz
h=13mm	2.69 GHz	-13.91 dB	2.84 GHz	-19.71 dB	252.0 MHz
h=14mm	2.69 GHz	-16.07 dB	2.84 GHz	-18.52 dB	287.03 MHz
h=15mm	2.68 GHz	-18.00 dB	2.84 GHz	-17.20 dB	313.8 MHz

Tabla 4.4: Nivel de adaptación y frecuencia de resonancia para diferentes alturas para una longitud fija del dipolo de $l=24\text{mm}$

Resulta curioso observar que para la frecuencia de resonancia magnética menor según aumenta la altura obtenemos un mejor nivel de adaptación de la antena, sin embargo pasa todo lo contrario para la frecuencia de resonancia mayor ya que según nos distanciamos del plano de masa obtenemos peores niveles de adaptación, aunque también es cierto que son buenos niveles en todos los casos. También podemos ver como a medida que aumenta la altura podemos conseguir un ancho de banda mayor. Salvo para $h=10\text{mm}$ en todas las alturas ambos picos están por debajo de -10dB y por tanto la antena está adaptada, por tanto hemos decidido elegir una altura en la que ambos picos tengan similar adaptación, es decir $h=14\text{mm}$, puesto que conseguiríamos también poca mejora en el ancho de banda si hubiésemos cogido una altura mayor.

4.3.2 Nivel de adaptación

De la misma forma que hicimos para el plano de masa con una metalización de un solo anillo, en este apartado compararemos el nivel de adaptación del dipolo cuando esta sobre el plano artificial con el nivel que tendría si lo colocásemos frente a un plano metálico o sin ningún plano. Las dimensiones del dipolo y la altura a la que se coloca el mismo serán para los tres casos las mismas, las obtenidas en el apartado anterior, es decir $l=48\text{mm}=0.32\lambda$ y $h=14\text{mm}=0.09\lambda$.

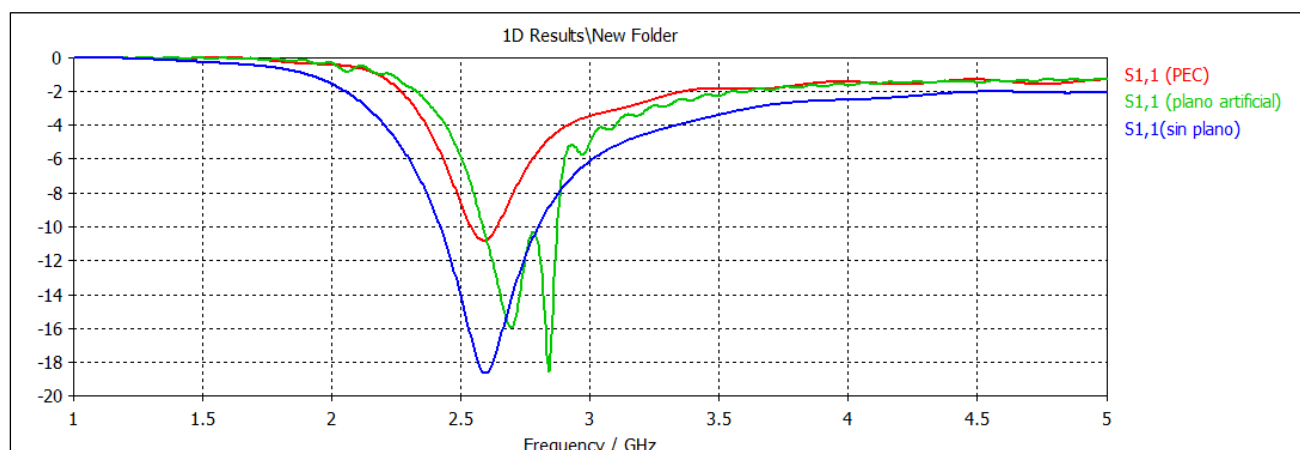


Figura 4.28: Nivel de adaptación del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14mm sobre el plano de masa con metalización en anillo

Como vemos en la Figura 4.28 los resultados obtenidos para la adaptación de la antena son bastante buenos ya que se asemejan bastante a los obtenidos en el caso que podríamos considerar como ideal, que es la situación en el que el dipolo no se sitúa sobre ningún plano. En este caso, la simulación nos indica que el dipolo sobre PEC con es la longitud y colocado a esa altura está prácticamente adaptado, lo cual es extraño y pensamos que puede ser erróneo.

4.3.3 Diagrama de radiación

Una vez conseguidos unos niveles de adaptación óptimos para el dipolo sobre la superficie con metalización de dos anillos, ahora conviene saber si la antena radia de una manera más o menos eficiente y sobre todo, en qué direcciones radia. Como la estructura está diseñada para poder trabajar a dos distintas frecuencias se necesitarán dos diagramas distintos, uno para cada frecuencia, para poder caracterizar completamente y de forma correcta el diagrama de radiación de la antena.

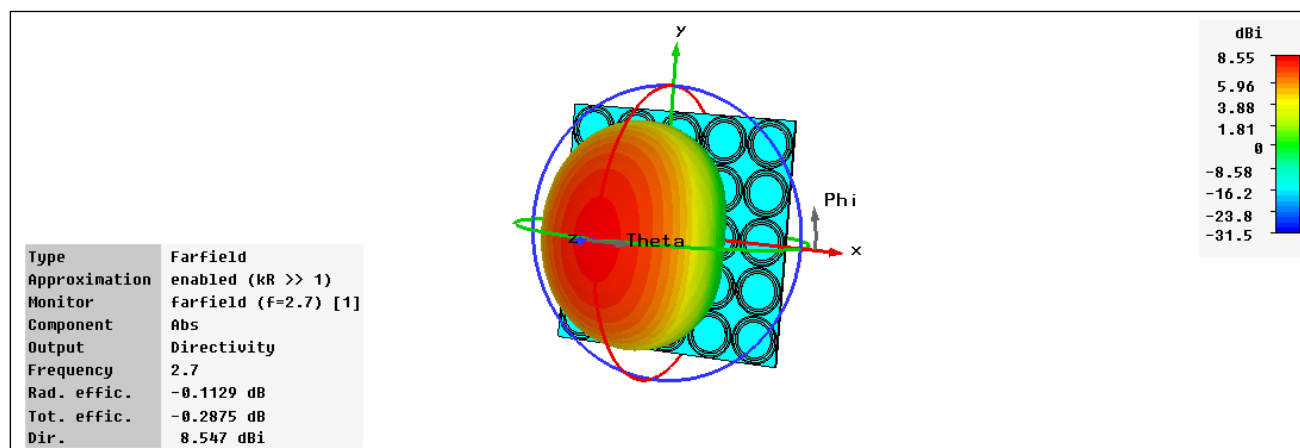


Figura 4.29: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos para una frecuencia de 2.70 GHz

La Figura 4.29 nos muestra el diagrama de campo lejano de nuestro conjunto en tres dimensiones, y como podemos observar tenemos el máximo de radiación en la dirección perpendicular al dipolo. También podemos ver que a priori no existen lóbulos secundarios, lo cual podremos ver de forma más clara en la Figura 4.30 correspondiente a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ en coordenadas polares.

La Figura 4.30 nos corrobora el hecho de que no existan lóbulos secundarios. Sin embargo se observa que existen ciertos niveles de radiación trasera, lo que implica que existirán pérdidas de energía.

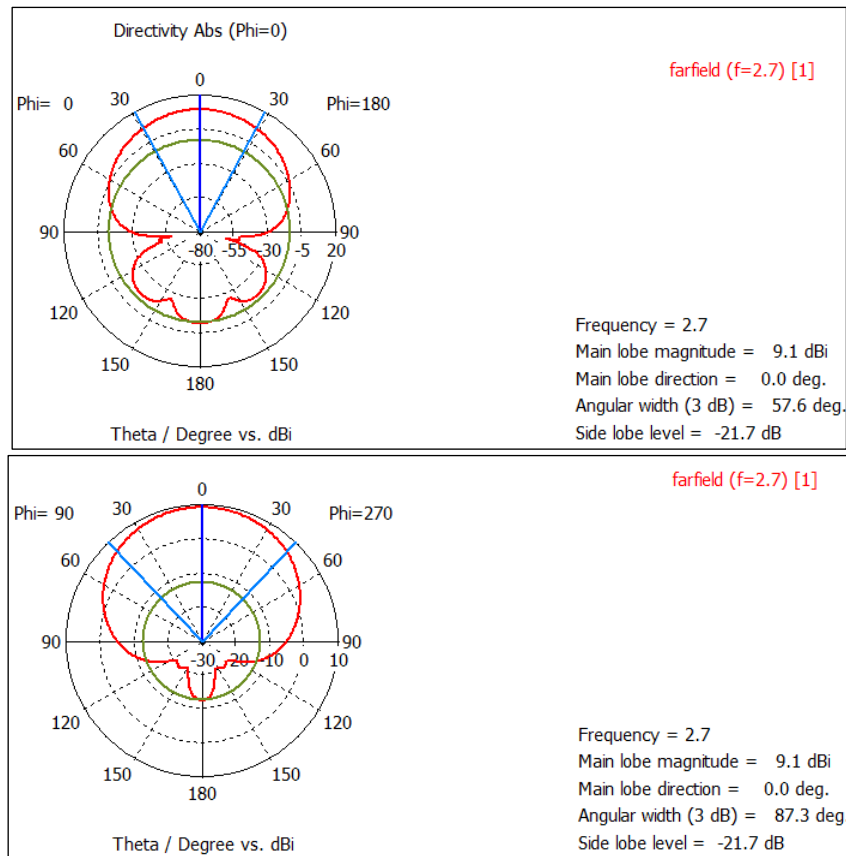


Figura 4.30: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos

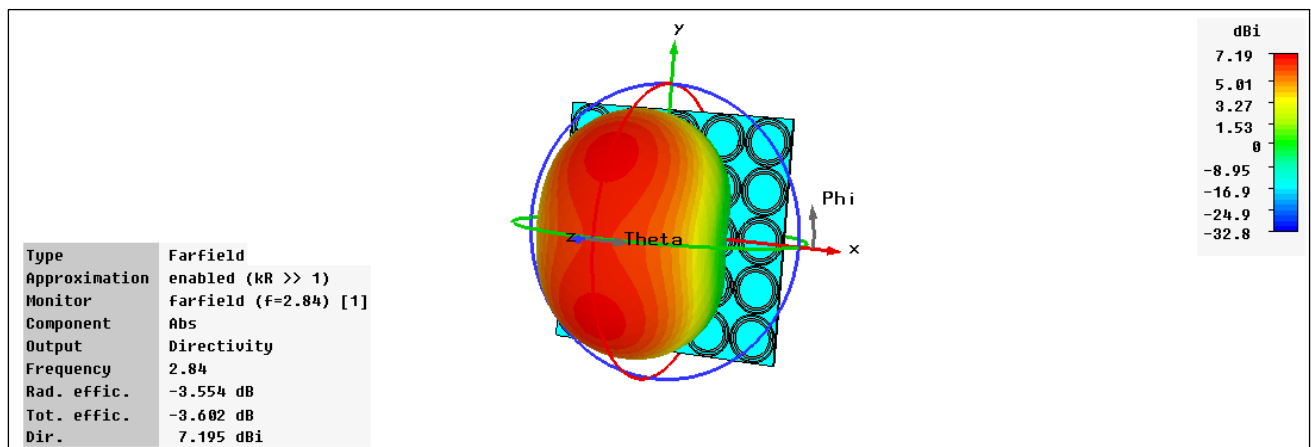


Figura 4.31: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos para una frecuencia de 2.84 GHz

En las Figuras 4.31 y 4.32 se muestran los diagramas para la frecuencia de resonancia mayor, en este caso se observa como la dirección de máxima radiación ha dejado de ser los cero grados que se tenían en la frecuencia menor, por lo que la antena en este caso no es broadside cuando trabaja a la frecuencia de 2.84 GHz. También observamos que la directividad es menor, en este caso es de 7.19 dBi cuando a la frecuencia menor era de 8.55 dBi. Otro hecho que podemos comparar es el ancho de haz a 3 dB, que también es mayor en este caso. Además seguimos viendo que existe radiación trasera que implicara pérdidas de energía.

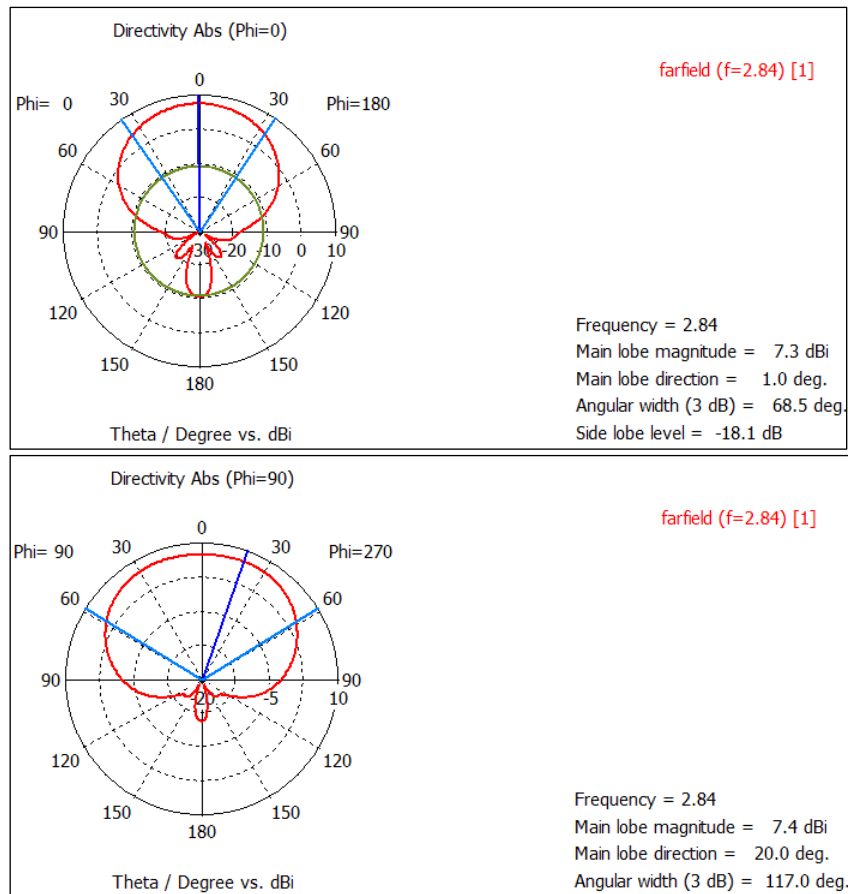


Figura 4.32: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos

4.3.4 Distribución campo eléctrico

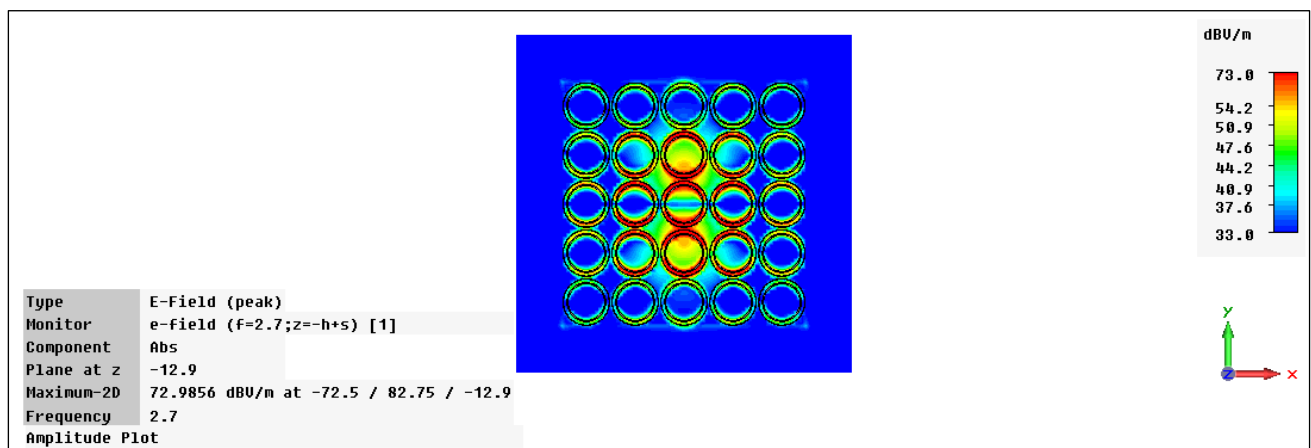


Figura 4.33: Diagrama de campo E generado por un dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos concéntricos a la frecuencia menor.

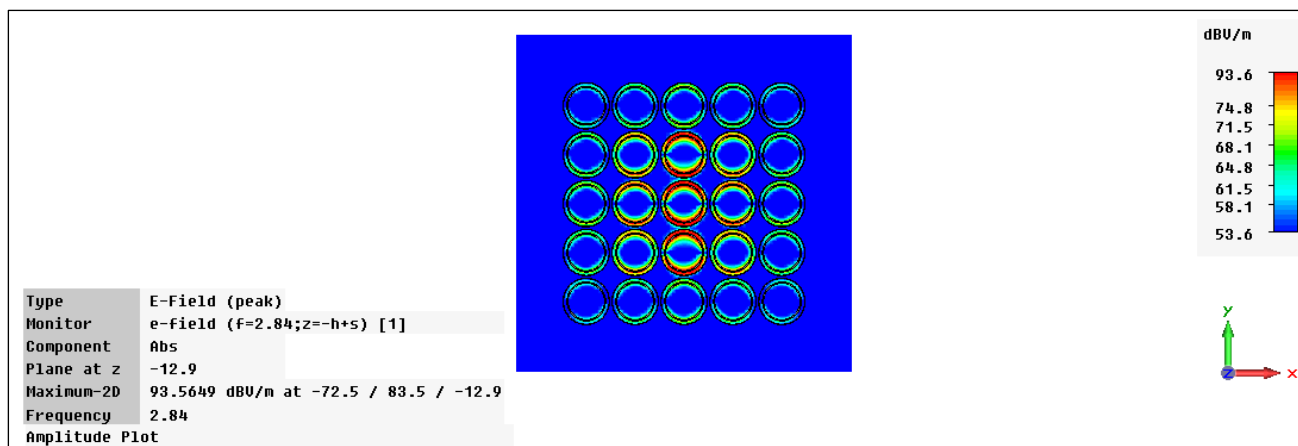


Figura 4.34: Diagrama de campo E generado por un dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos concéntricos a la frecuencia mayor.

Las figuras 4.33 y 4.34 nos muestran la distribución del campo eléctrico en la superficie de nuestro plano para las frecuencias de resonancia de 2.7 GHz y 2.84 GHz, si las analizamos vemos que la mayor excitación es más visible en la zona central más cercana a donde se encuentra el dipolo, siendo los anillos exteriores los que presentan una amplitud de campo mucho menor. Por tanto al igual que vimos en la anterior metalización podemos deducir que los elementos centrales serán los principales responsables del comportamiento general del diseño, y probablemente cambios en los elementos exteriores no producirían un significativo cambio en los resultados de nuestro conjunto.

4.4 Caracterización del conjunto dipolo-plano de masa con metalización de anillos superpuestos en distintos sustratos

En este siguiente apartado vamos a estudiar la influencia que tiene sobre la radiación del dipolo nuestro plano de masa artificial, para el otro tipo de metalización estudiado previamente, el de anillos superpuestos en distintos sustratos. El objetivo en este apartado es observar si la antena se adapta a las dos frecuencias de resonancia debidas a cada uno de los anillos, como vimos en el capítulo anterior. El esquema de nuestro conjunto dipolo-plano es el siguiente:

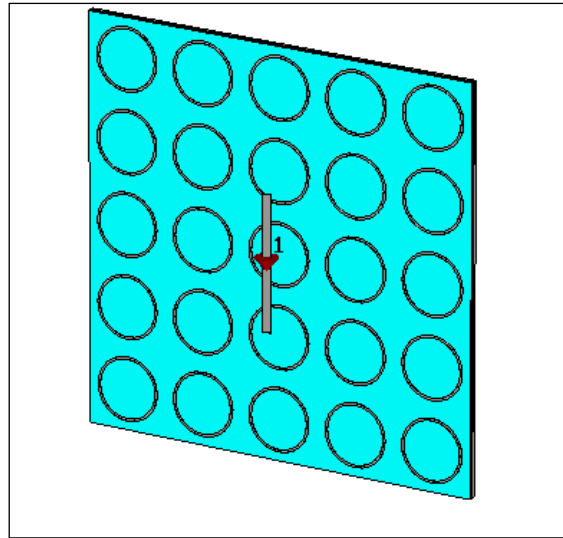


Figura 4.35: conjunto dipolo-plano de masa con metalización de anillos superpuestos

En la siguiente tabla mostramos las dimensiones o características de cada una de las variables de nuestro conjunto dipolo-plano. Para las dimensiones radiales de los anillos tomamos aquellas dimensiones que nos dieron resultados óptimos en el capítulo anterior. A la hora de elegir el número de celdas del plano hemos considerado la misma que para el anterior estudio con una metalización de un solo anillo, es decir un total de 5 periodos que junto con la separación entre anillos nos lleva a unas dimensiones del plano de 160x160 mm ($0.93\lambda \times 0.93\lambda$)

Características de la estructura		
Metalización anillo exterior	Referencia	Valor
	Radio externo	15.5 mm
	Radio interno	14.5 mm
	Anchura del anillo	1 mm
	Espesor anillo	0.1 mm
Metalización anillo interior	Separación entre anillos	2 mm
	Radio externo	13 mm
	Radio interno	12 mm
	Anchura del anillo	1 mm
	Espesor anillo	0.1 mm
Sustrato	Separación entre anillos	2 mm
	Ancho celda unidad	33 mm
	Espesor	1.78 mm
Plano de masa	Material	Polietileno ($\epsilon_r = 2.2$)
	Espesor	1.5 mm
Dipolo	Material	Aluminio
	Longitud	75 mm
	Ancho brazo	4 mm
	Espesor	0.1 mm

Tabla 4.5: Conjunto dipolo-plano de masa con metalización de anillos superpuestos

4.4.1 Cálculo del tamaño y altura del dipolo

De la misma manera que para las anteriores metalizaciones estudiadas, vamos a buscar aquel tamaño y altura respecto al plano de masa que sean óptimos para que el dipolo tenga una mejor adaptación en las dos frecuencias en las que trabaja. Para ello haremos un barrido de longitudes para el dipolo a diferentes alturas entre 10mm ($\lambda_{2\text{GHz}}/15$) y 15mm ($\lambda_{2\text{GHz}}/10$) que como vimos en los anteriores casos son las alturas en las que vemos buenos resultados.

El dipolo lo hemos colocado en el centro de la estructura paralelo a la misma. De nuevo mencionamos que dada la simetría de las metalizaciones el sentido en el cual coloquemos el dipolo es indiferente.

- $h=10$

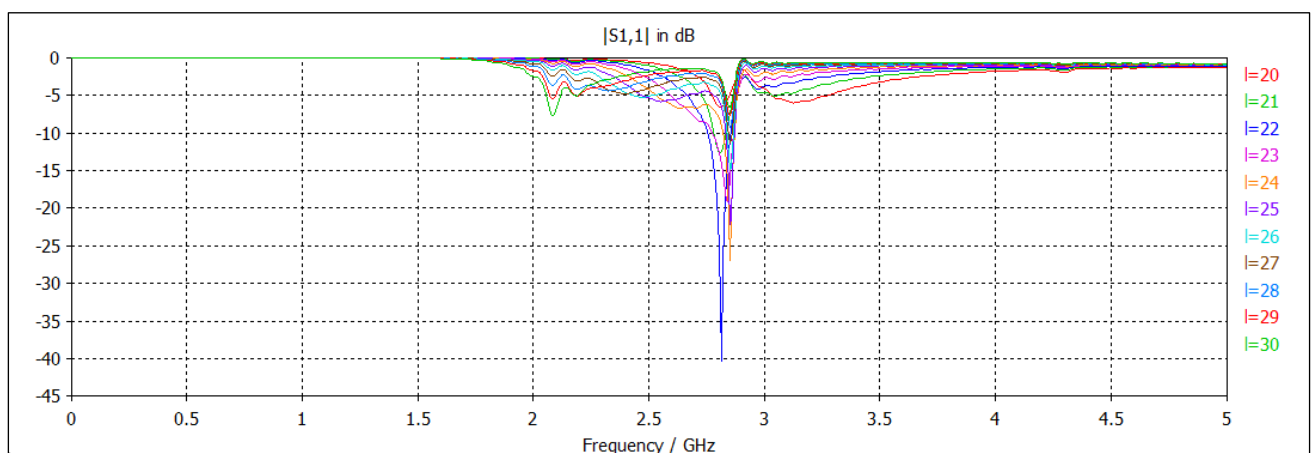


Figura 4.36: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 10mm

- $h=11$

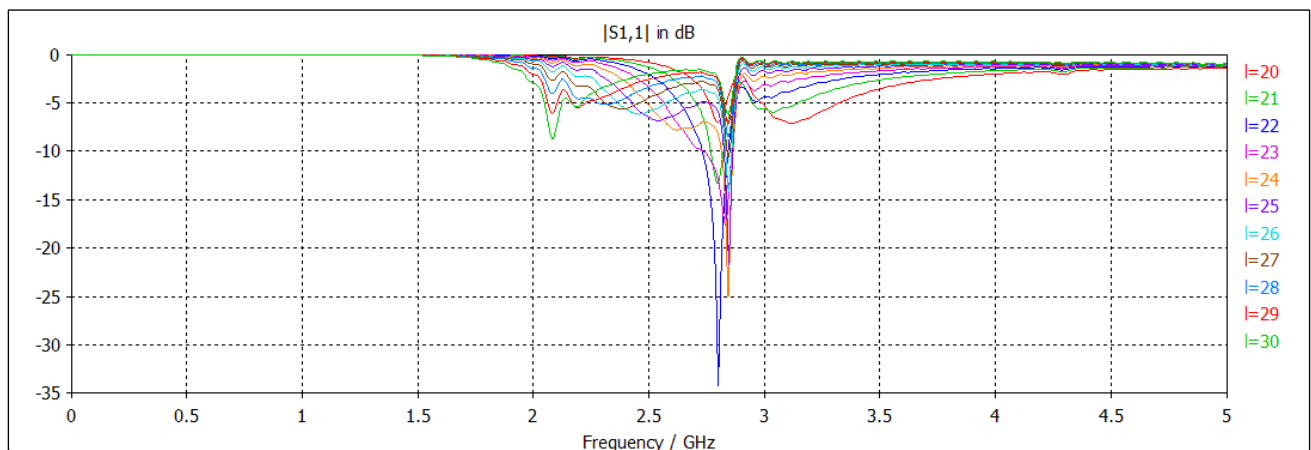


Figura 4.37: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 11mm

- $h=12$

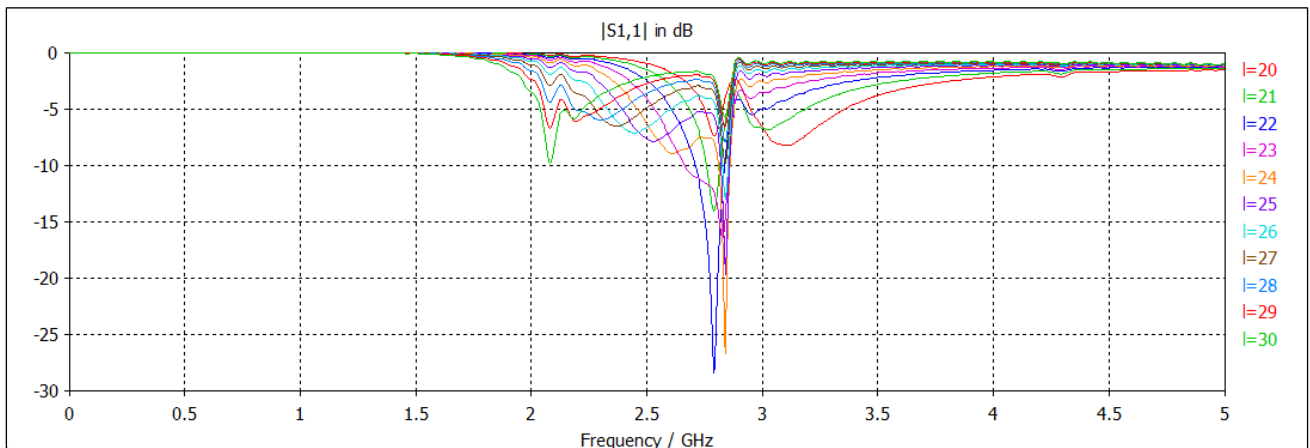


Figura 4.38: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 12mm

- $h=13$

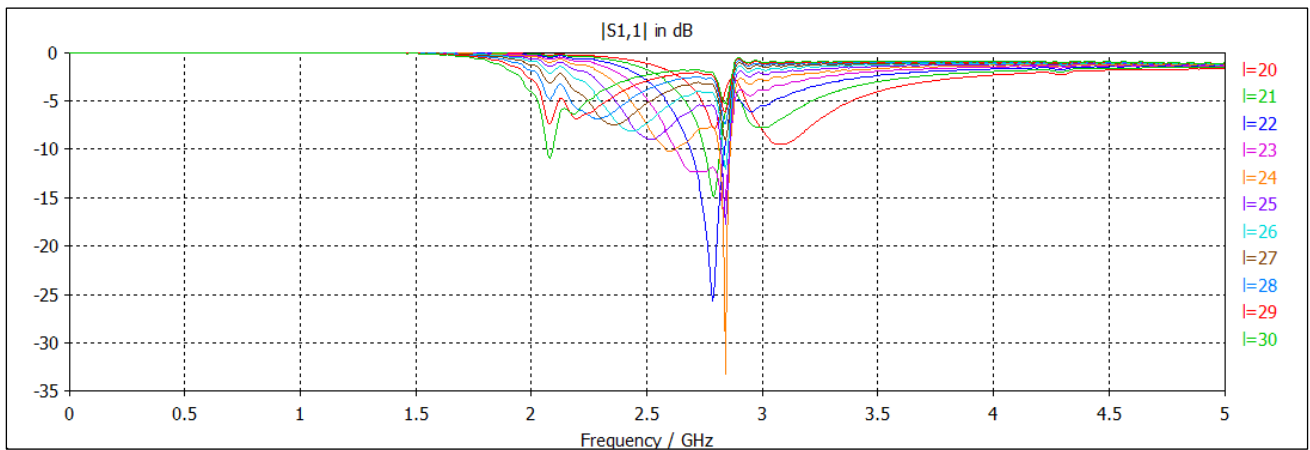


Figura 4.39: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 13mm

- $h=14$

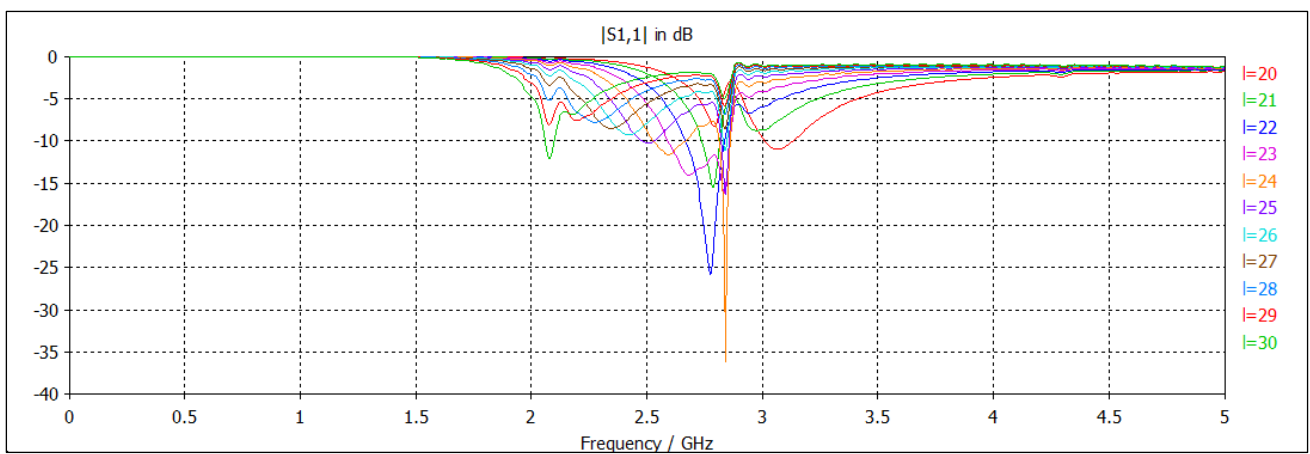


Figura 4.40: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 14mm

- $h=15$

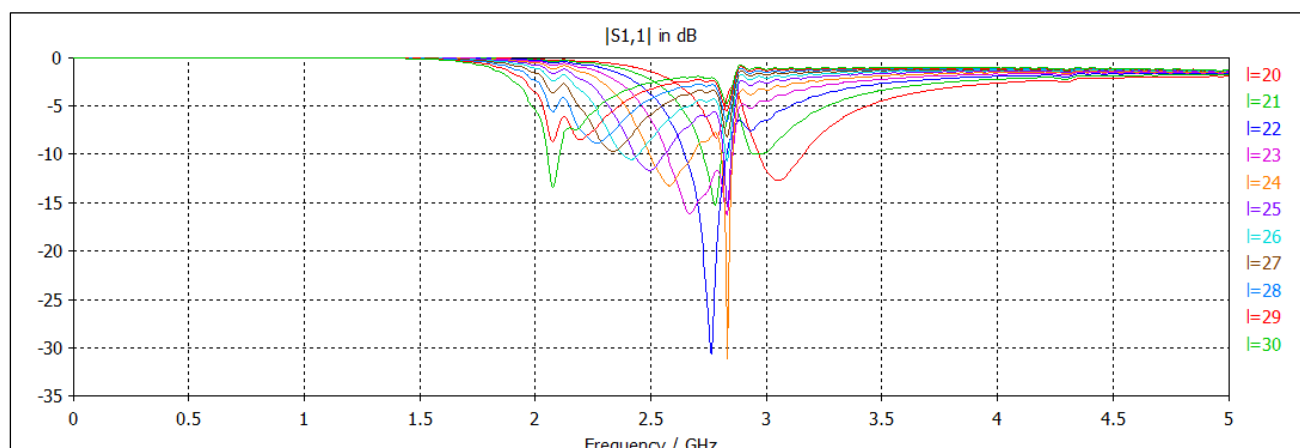


Figura 4.41: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 15mm

Analizando los barridos de longitudes para diferentes alturas del dipolo respecto al plano de masa, comprobamos que empezamos a conseguir resultados de adaptación de la antena a partir de 13 mm (0.08λ). Estos resultados suelen conseguirse para longitudes del dipolo entre 23mm y 25 mm generalmente. Estas longitudes, por motivos de diseño en el simulador utilizado corresponden a la mitad del dipolo, por lo que la longitud del dipolo completo entre las que buscaríamos la óptima sería entre 46mm (0.30λ) y 50mm (0.33λ). Si comparamos con las otras metalizaciones vemos que son relativamente más pequeñas que en el caso de un anillo y muy similares al anterior caso en el que teníamos dos anillos concéntricos sobre el mismo sustrato.

Viendo los resultados, hemos elegido un tamaño de $l=23\text{mm}$ puesto que es el que da unos niveles de pérdidas de retorno muy similares para las dos frecuencias en las que trabajamos. Para buscar cuál es la mejor altura a la que deberíamos colocar nuestra antena, recogemos en la siguiente gráfica los resultados para $l=23\text{mm}$ en las alturas entre 13mm y 15mm.

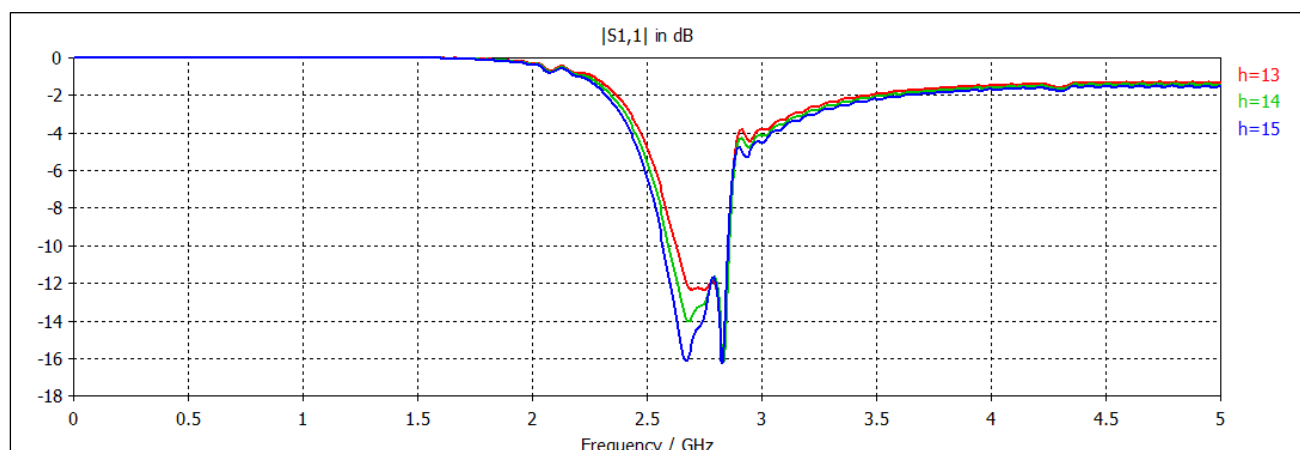


Figura 4.42: Nivel de adaptación para diferentes alturas para una longitud fija del dipolo de $l=23\text{mm}$

Altura respecto PEC(h)	Frec. Res. magnética menor	Nivel de adaptación	Frec. Res. magnética mayor	Nivel de adaptación	Ancho de banda
$h=13\text{mm}$	2.71 GHz	-12.34 dB	2.83 GHz	-16.22 dB	228.71 MHz
$h=14\text{mm}$	2.68 GHz	-14.04 dB	2.83 GHz	-16.21 dB	265.34 MHz
$h=15\text{mm}$	2.66 GHz	-16.12 dB	2.83 GHz	-16.26 dB	283.16 MHz

Tabla 4.6: Nivel de adaptación y frecuencia de resonancia para diferentes alturas para una longitud fija del dipolo de $l=23\text{mm}$

En este caso observamos que los mejores resultados los obtenemos para la mayor altura $h=15\text{mm}=0.1\lambda$ ya que existen dos picos en los que el dipolo está adaptado a unos niveles muy parecidos (-16.12 dB y -16.26 dB). También resulta curioso observar que la altura apenas afecta a la frecuencia de resonancia mayor ya que mantiene unos niveles de adaptación muy parecidos en todos los casos. En cuanto a los niveles de ancho de banda vemos que hay apenas 60MHz de diferencia entre las 3 distancias, teniendo un valor muy parecido al que obtuvimos en la metalización de dos anillos concéntricos.

4.4.2 Nivel de adaptación

En este apartado compararemos los niveles de adaptación que tendría el dipolo en las tres situaciones distintas, cuando se sitúa sobre el plano con la metalización de anillos superpuestos en dos sustratos diferentes, sobre un plano metálico, y cuando no tiene ningún plano. Todas las situaciones para que podamos hacer la comparación se harán con las dimensiones del dipolo y la altura que hemos obtenido en este último apartado, $l=46\text{mm}$ y $h=15\text{mm}$.

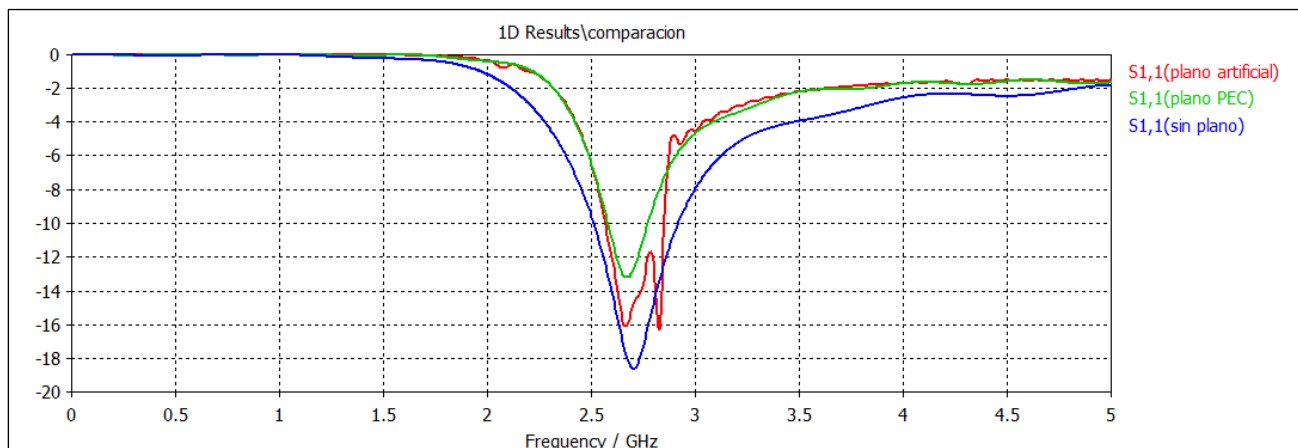


Figura 4.43: Nivel de adaptación del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15mm sobre el plano de masa con metalización en anillos superpuestos

Podemos observar en la Figura 4.40 como seguimos obteniendo buenos resultados en comparación con los niveles de adaptación del dipolo en el caso que podríamos denominar como “ideal” que sería el caso en el que el dipolo se encuentra en el vacío.

Una vez estudiadas las tres metalizaciones previstas, vamos comparar en una gráfica los resultados obtenidos para las dimensiones óptimas en cada caso.

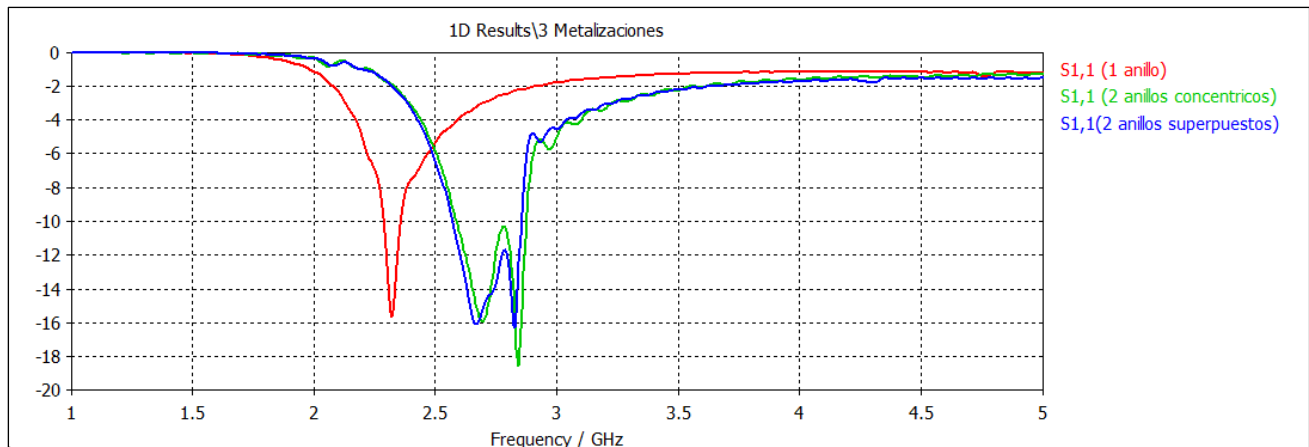


Figura 4.44: Nivel de adaptación del dipolo para las tres metalizaciones estudiadas

Altura respecto PEC(h)	Frec. Res. magnética menor	Nivel de adaptación	Frec. Res. magnética mayor	Nivel de adaptación	Ancho de banda
1 anillo	2.32 GHz	-15.62 dB	-	-	70.70 MHz
2 anillos concéntricos	2.69 GHz	-16.07 dB	2.84 GHz	-18.52 dB	287.03 MHz
2 anillos superpuestos	2.66 GHz	-16.12 dB	2.83 GHz	-16.26 dB	283.16 MHz

Tabla 4.7: Comparación entre los niveles de adaptación y anchos de banda de las tres metalizaciones estudiadas

Como vemos en la Figura 4.41 las pérdidas de retorno (S_{11} (dB)) son muy parecidas en los tres casos y como vimos en cada uno de los apartados cuando lo comparábamos con el dipolo en el caso de estar en el vacío, eran muy buenos resultados. También resulta curioso observar que las dos últimas metalizaciones estudiadas tienen resultados tanto de frecuencia de resonancia como de nivel de adaptación muy similares, por tanto casi se podría decir que es equivalente colocar dos anillos concéntricos que dos anillos superpuestos en sustratos diferentes. Es interesante también ver el gran aumento de ancho de banda que obtenemos al pasar de la metalización de 1 anillo a las metalización que tenemos 2 anillos en cada celda. Esto puede resultar útil en determinadas aplicaciones, ya que por un mínimo coste podemos aumentar el ancho de banda de manera considerable.

4.4.3 Diagramas de radiación

En las Figuras 4.45 y 4.46 mostramos las representaciones en tres dimensiones y en coordenadas polares para cortes de $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ respectivamente. En la figura 4.45 podemos observar de nuevo que el máximo de radiación presenta dirección broadside ($\Theta=0^\circ$). Además si giramos la figura también observaremos la ausencia de radiación trasera del dipolo y de lóbulos secundarios, lo cual se puede ver con más claridad en la figura 4.46, donde se observan claramente que existe un único lóbulo principal bien definido que presenta simetría de revolución.

Por tanto la no existencia de lóbulos secundarios y radiación trasera hace que no se desperdicie en energía y se consiga una buena directividad en la dirección broadside, aunque si comparamos con las anteriores metalizaciones observamos un ligero descenso de la misma

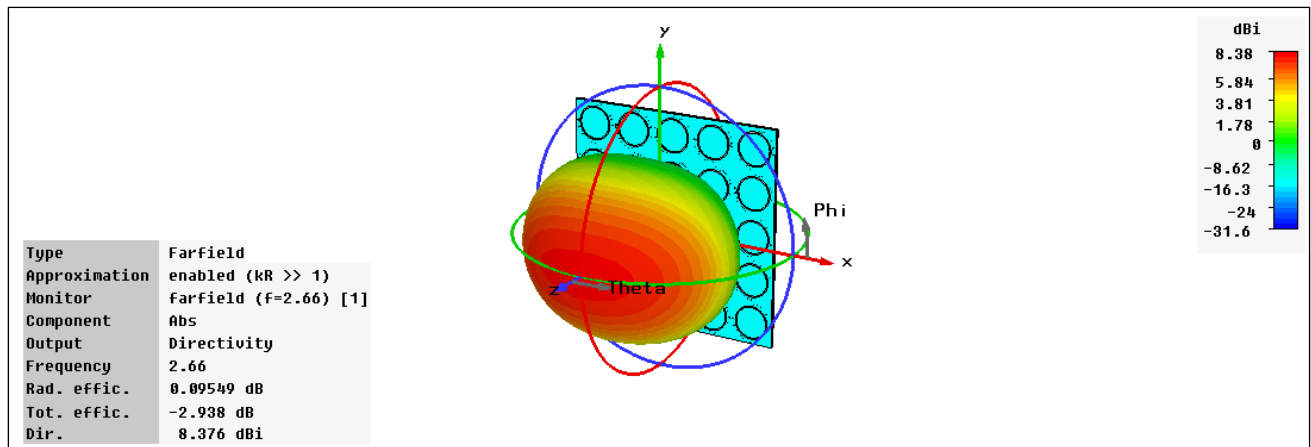


Figura 4.45: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.66 GHz

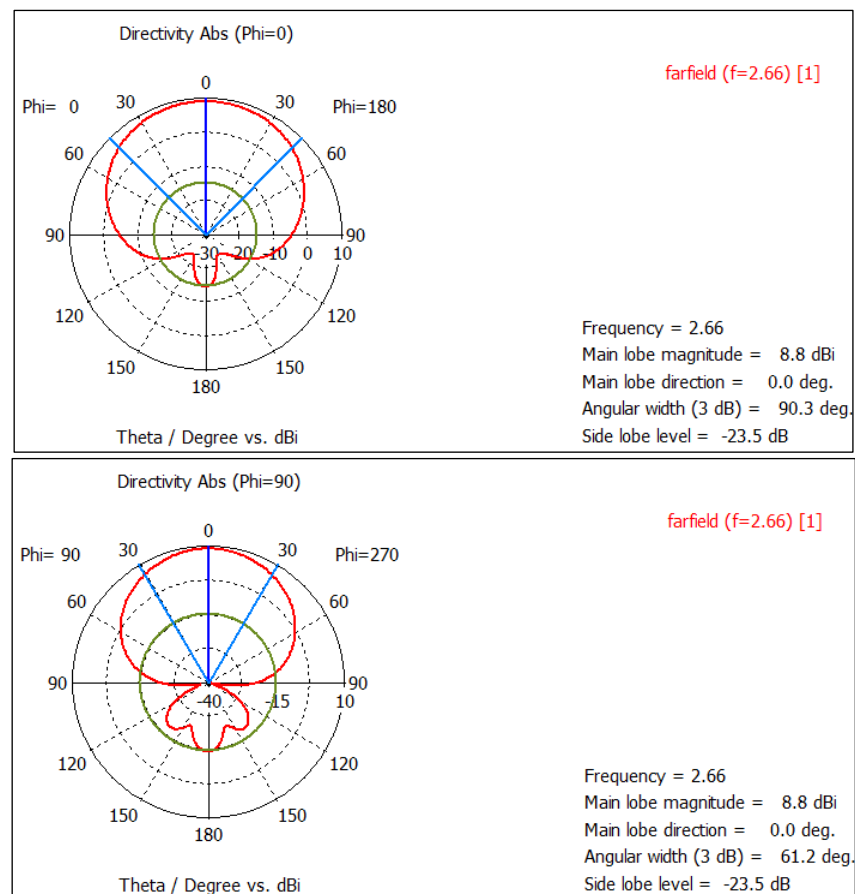


Figura 4.46: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.66 GHz.

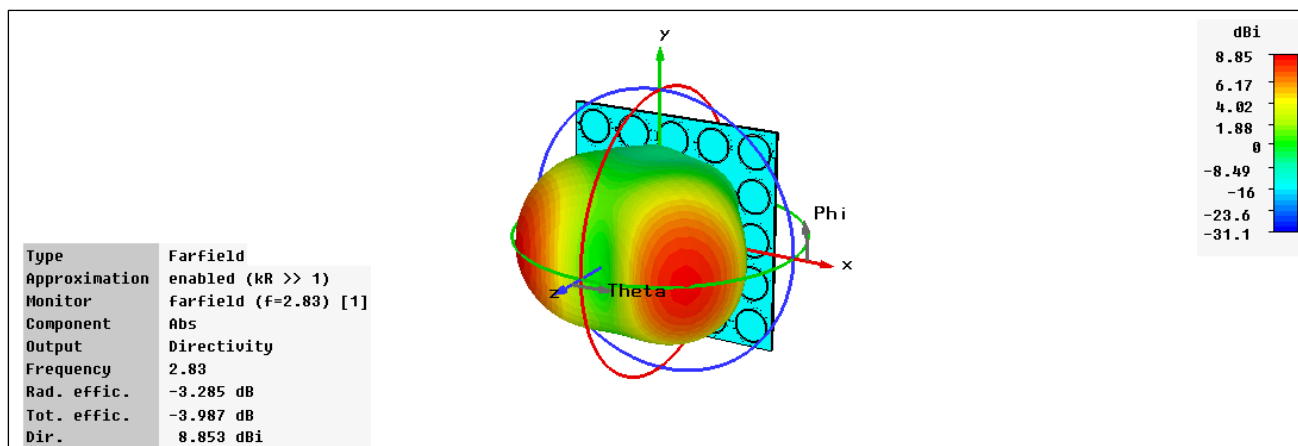


Figura 4.47: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.83 GHz

En las figuras 4.47 y 4.48 se observa los diagramas de radiación para la frecuencia de resonancia mayor ($f=2.83$ GHz). La forma que presenta es algo más irregular que la anterior, la dirección máxima ya no se encuentra en la dirección broadside, sino que se encuentra a 45° para $\phi=0^\circ$. La directividad máxima es de 8.9 dBi y 1.2dBi para $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ respectivamente. Valores muy similares a los obtenidos anteriormente. Además estas graficas nos indican que para el corte de $\phi=90^\circ$ existe un lóbulo secundario de -8.2 dBi aunque si se observa la forma de la grafica se puede ver que prácticamente este lóbulo secundario puede ser considerado parte del lóbulo principal por lo que la perdida de energía que supondría el tener ese lóbulo se ve minimizada.

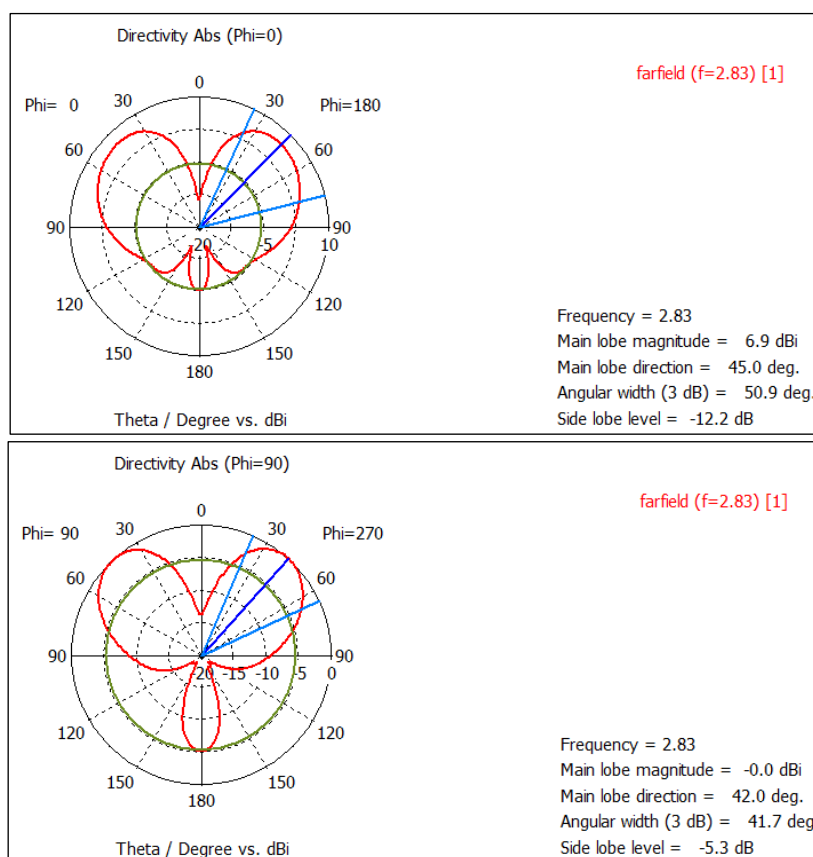


Figura 4.48: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.83 GHz

4.4.4 Distribución campo eléctrico

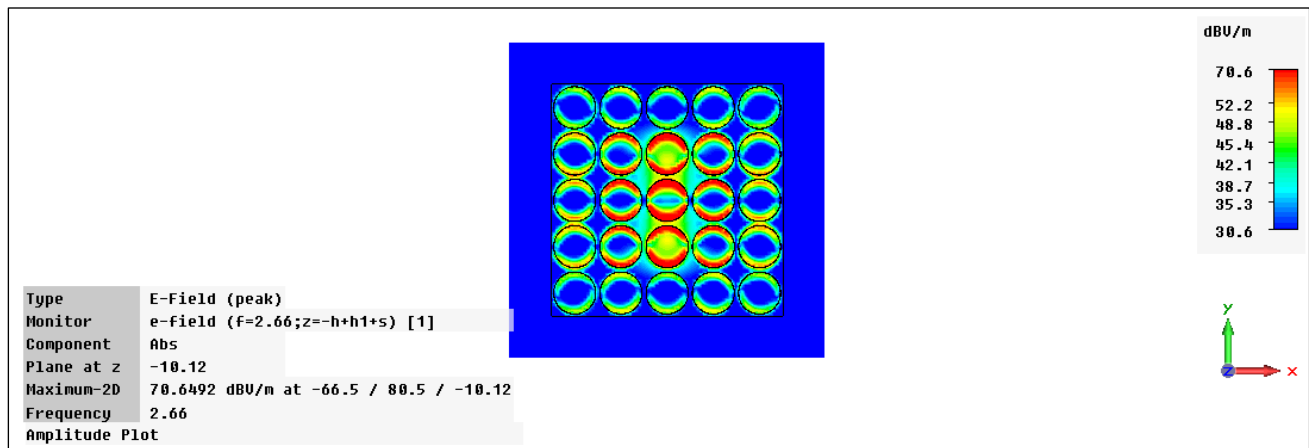


Figura 4.49: Distribución de campo eléctrico del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos.

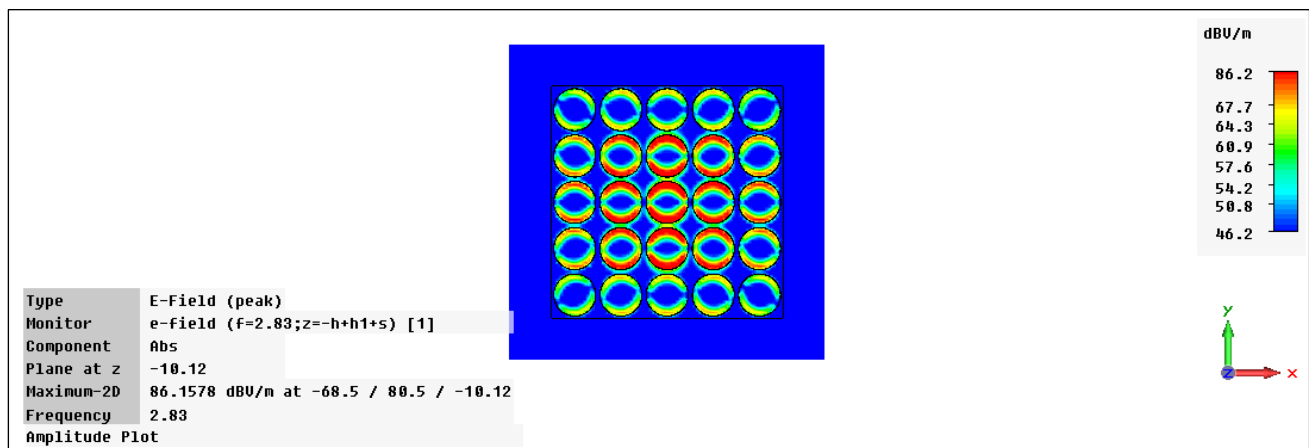


Figura 4.50: Distribución de campo eléctrico del dipolo del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos.

Las figuras 4.49 y 4.50 nos muestran la distribución del campo eléctrico en la superficie de nuestro plano para las frecuencias de resonancia de 2.66 GHz y 2.83 GHz, si las analizamos vemos que la mayor excitación es más visible en la zona central más cercana a donde se encuentra el dipolo, aunque en este caso a diferencia de las anteriores metalizaciones tenemos una mayor amplitud del campo eléctrico en los anillos exteriores. Así que en este caso es probable que si hacemos cambios tanto en los anillos interiores como en los anillos exteriores puedan producirse variaciones significativas en la radiación de la antena.

4.5 Reducción del tamaño del plano de masa

Hasta ahora no hemos tenido en cuenta el tamaño del plano de masa a la hora del diseño de nuestro conjunto, ya que tomamos un tamaño por defecto y lo mantuvimos para todas las simulaciones, teniendo en cuenta restricciones solo en varios parámetros como el tamaño o altura del dipolo o las pérdidas de retorno (S11). Como además buscamos que el conjunto sea lo más pequeño posible es interesante que veamos si podemos reducir aún más el número de metalizaciones en vista a que el tamaño del plano de masa sea menor. Para ello reduciremos el plano de masa de 5 periodos como teníamos hasta ahora a 3 periodos, por lo que el tamaño se verá reducido sustancialmente de 160x160mm a 96x96mm es decir más de 6 cm por lado. Analizaremos los casos para las 3 metalizaciones del capítulo anterior.

4.5.1 Anillo simple

El esquema del conjunto se muestra en la siguiente figura, como dijimos hemos reducido el número de anillos de los 25 que teníamos anteriormente a 9.

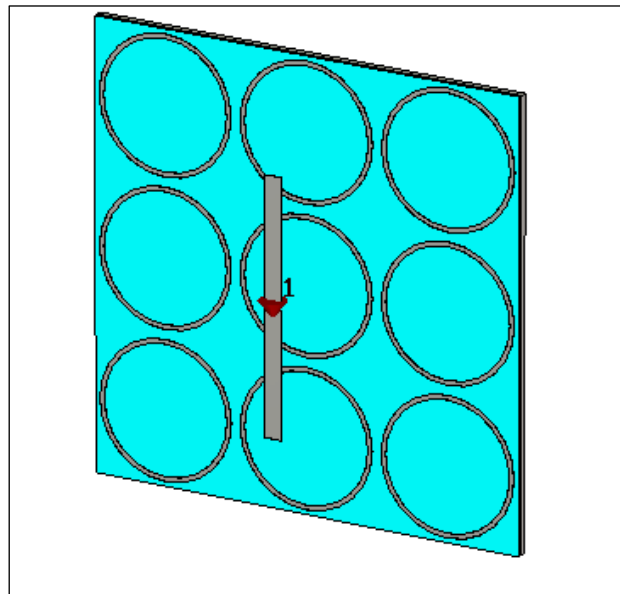


Figura 4.51: conjunto dipolo-plano de masa 3x3 con metalización de anillo simple

4.5.1.1 Nivel de adaptación

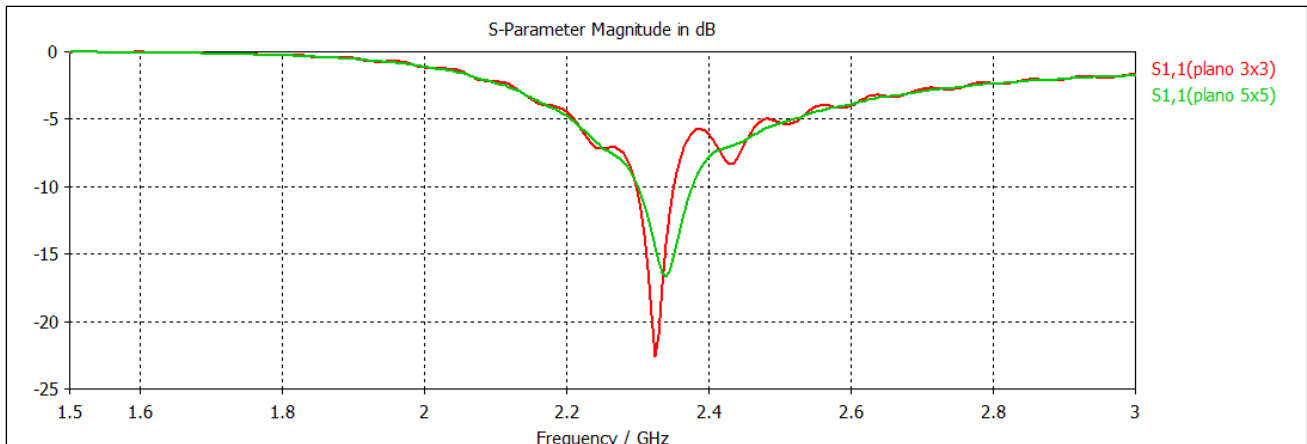


Figura 4.52: Comparación del nivel de adaptación del dipolo de tamaño 0.36λ colocado a 13mm sobre diferentes planos con metalización de anillo simple

Como vemos en la figura 4.52 los resultados de adaptación son notablemente mejores, con unas pérdidas de retorno que pasan de -16dB en el caso del plano de 5x5 anillos a aproximadamente -22dB para el plano reducido de 3x3 anillos. De todas formas para ver si realmente es una buena solución el recortar el plano debemos analizar los diagramas de radiación. También se observa una mínima reducción de alrededor de 20MHz en el ancho de banda al reducir el tamaño del plano de masa.

4.5.1.2 Diagramas de radiación

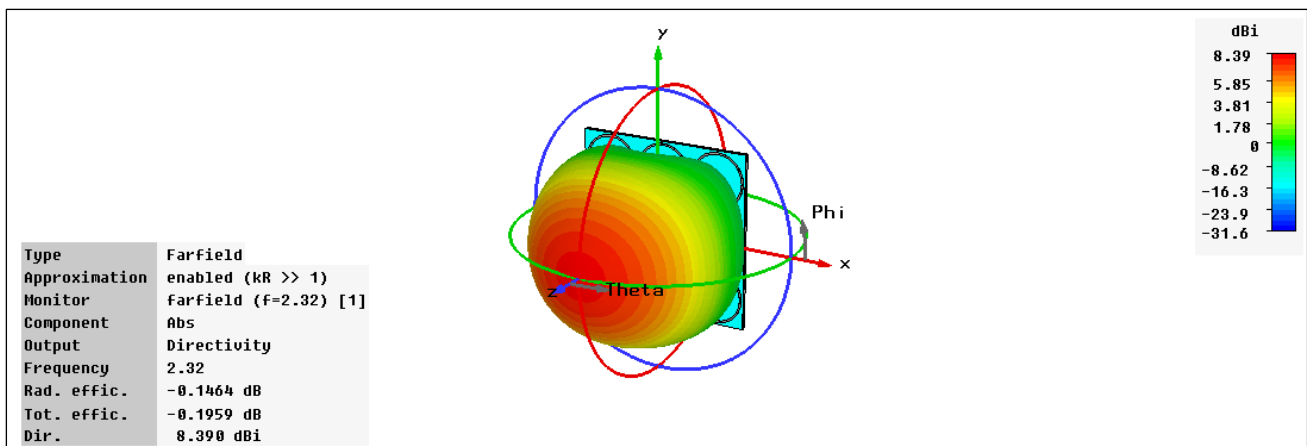


Figura 4.53: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.36λ colocado a 13 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de anillo simple para una frecuencia de 2.33 GHz

En las figuras 4.53 y 4.54 podemos destacar en comparación con el caso del plano 5x5 es la disminución de la directividad en la dirección broadside, además de que como vemos aparecen lóbulos secundarios de un nivel importante. También algo que es bastante perjudicial es el hecho de tener radiación trasera ya que significa que se pierde gran parte de energía en forma de radiación no útil.

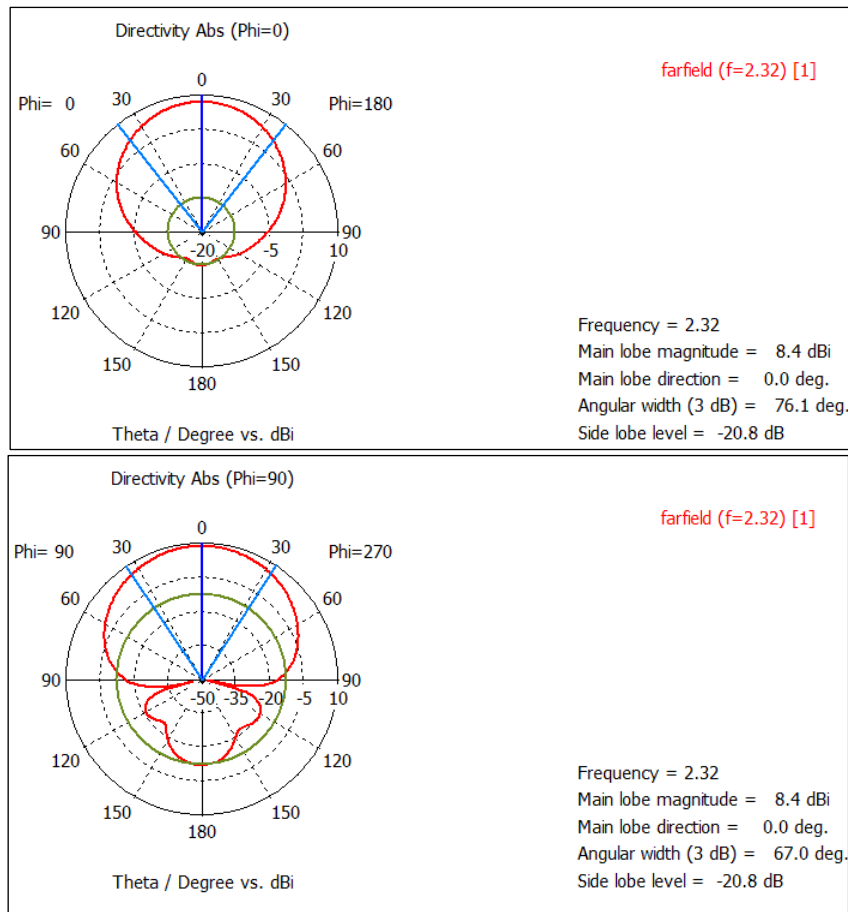


Figura 4.54: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.36λ colocado a 13 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de un anillo simple para una frecuencia de 2.33 GHz

4.5.2 Dos anillos concéntricos

El siguiente análisis lo haremos para el plano con la metalización de dos anillos concéntricos, cuyo esquema es el mostrado en la figura

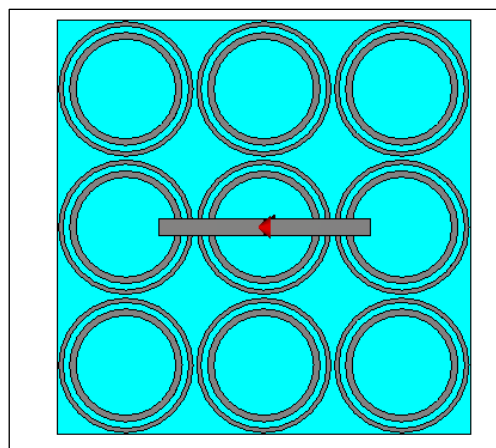


Figura 4.55: conjunto dipolo-plano de masa 3x3 con metalización de dos anillos concéntricos

4.5.2.1 Nivel de adaptación

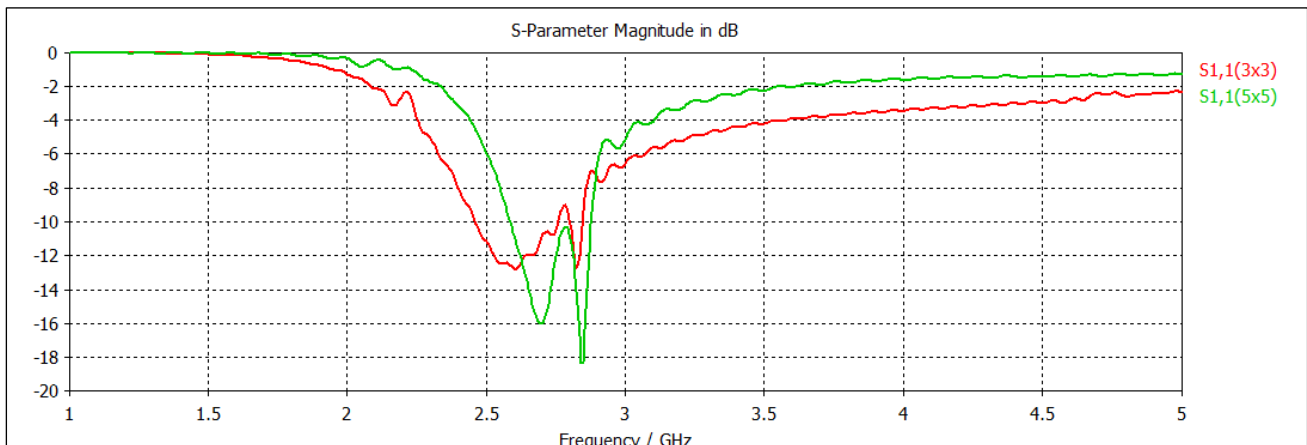


Figura 4.56: Comparación del nivel de adaptación del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14mm sobre diferentes planos con metalización de dos anillos concéntricos.

En este caso viendo los resultados de la figura 4.56 notamos que las pérdidas de retorno o lo que es lo mismo el nivel de adaptación de la antenna ha disminuido respecto al plano 5x5, aunque seguimos teniendo los dos picos de las frecuencias de resonancia por debajo de -10dB, el límite máximo para considerar que la antenna está adaptada. Además la variación en ambas frecuencias de resonancias es de alrededor de 90 MHz para la frecuencia menor y de 30 MHz para la mayor, cambios poco significativos para el fin de este proyecto. Si nos fijamos en el ancho de banda, podemos notar que aumenta alrededor de 70 MHz, cambios apenas considerables.

4.5.2.2 Diagramas de radiación

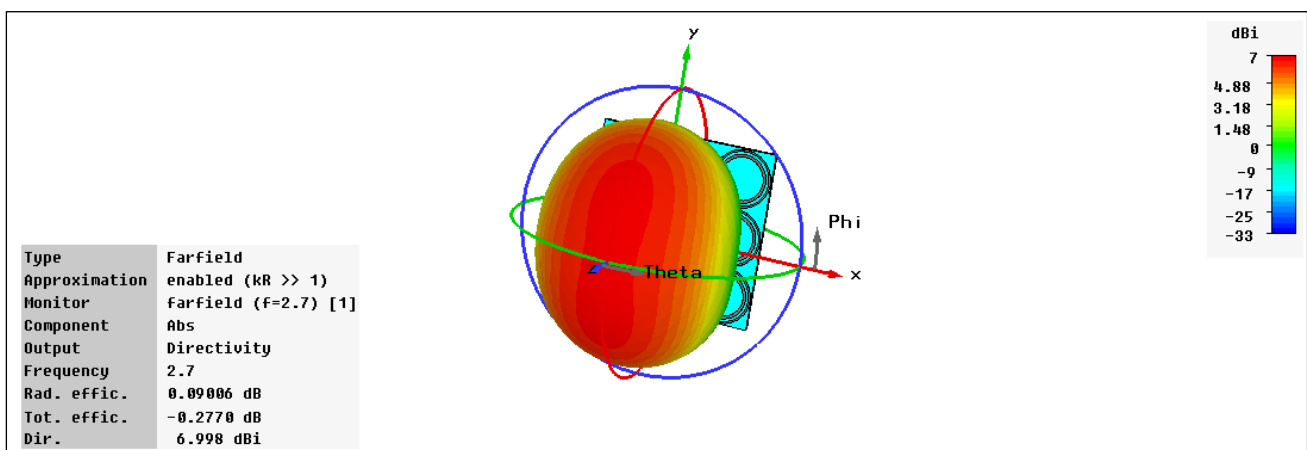


Figura 4.57: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de dos anillos concéntricos para una frecuencia de 2.7 GHz

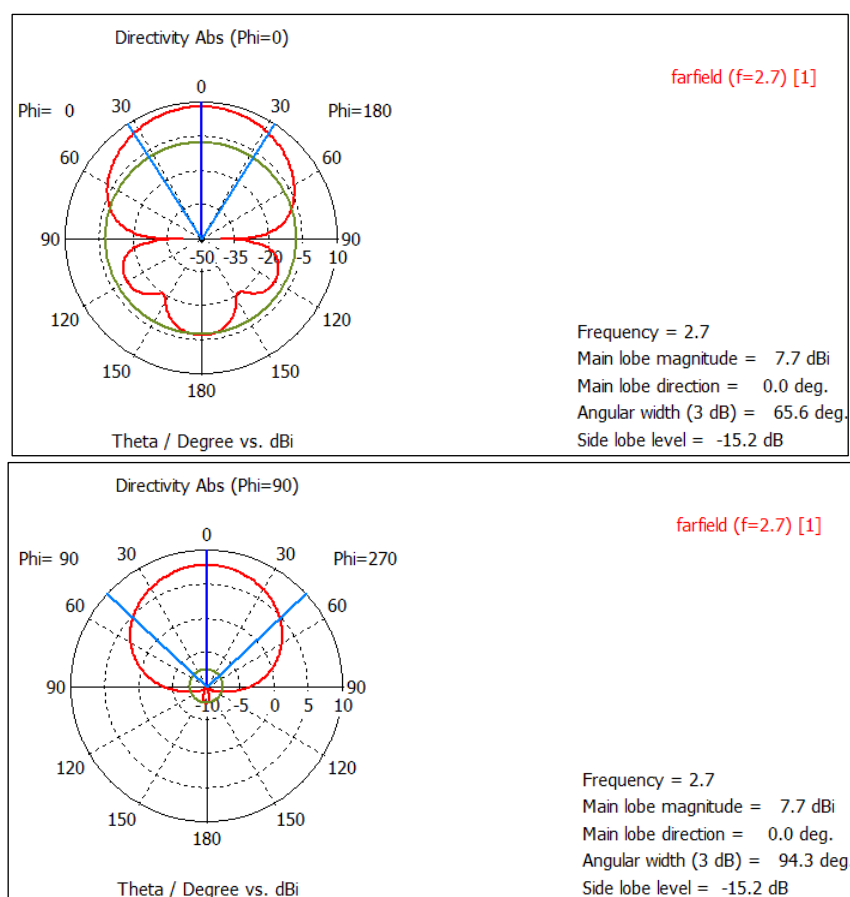


Figura 4.58: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de dos anillos concéntricos para una frecuencia de 2.7 GHz

En la figura 4.57 y 4.58 mostramos los diagramas de radiación en 3D y en coordenadas polares para la frecuencia de resonancia menor en 2.7GHz. Haciendo una comparación entre estos y los obtenidos apartados atrás cuando teníamos un tamaño de plano de 5x5, vemos que el ancho de haz a 3dB ha aumentado, aunque ello ha conllevado a una reducción de la directividad aunque son diferencias no significativas. Como vemos sigue sin haber ni radiación trasera ni aparecen lóbulos secundarios, lo cual implica que no hay demasiadas perdidas de energía.

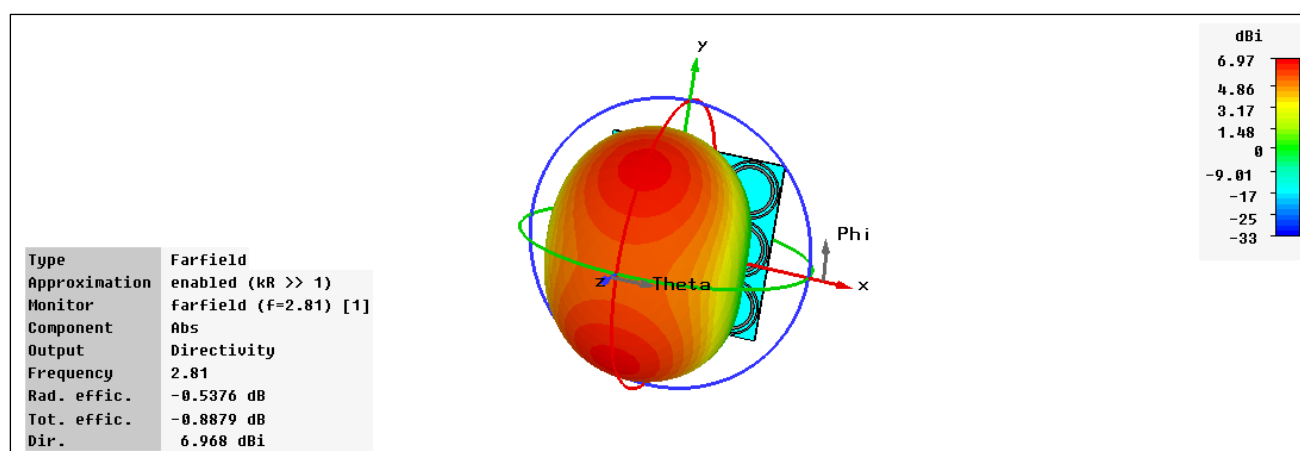


Figura 4.59: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de dos anillos concéntricos para una frecuencia de 2.81 GHz

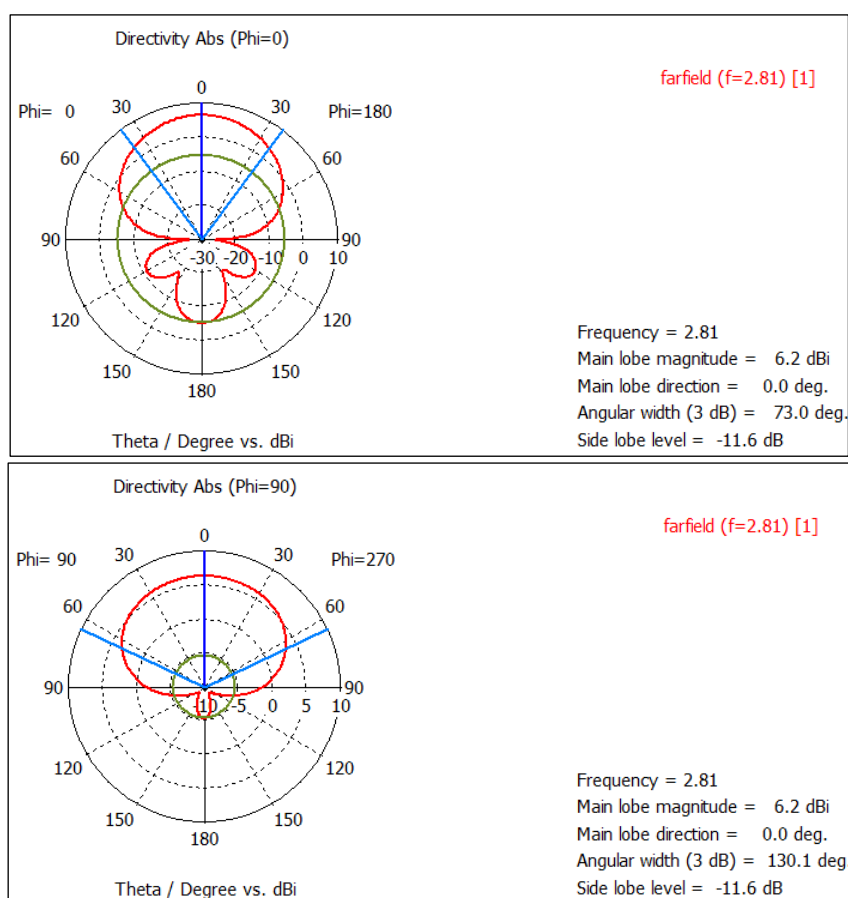


Figura 4.60: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.32λ colocado a 14 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de dos anillos concéntricos para una frecuencia de 2.81 GHz

Los resultados para la frecuencia de resonancia mayor de 2.81 GHz se muestran en las Figuras 4.59 y 4.60. Si lo comparamos con los resultados del plano 5x5 vemos que igualmente hay un aumento del ancho de haz a 3dB a costa de verse reducido aunque minimamente la directividad. Sigue habiendo un lóbulo secundario en el corte de $\phi=0^\circ$ de mayor nivel en este caso, aunque viendo la figura se podría considerar parte del lóbulo principal. Además como vemos seguimos sin tener radiación trasera.

4.5.3 Anillos superpuestos en diferentes sustratos

El último análisis que nos queda por realizar es el del plano 3x3 para la metalización en la que teníamos dos anillos en diferentes sustratos uno encima del otro. El esquema se muestra en la figura 4.61.

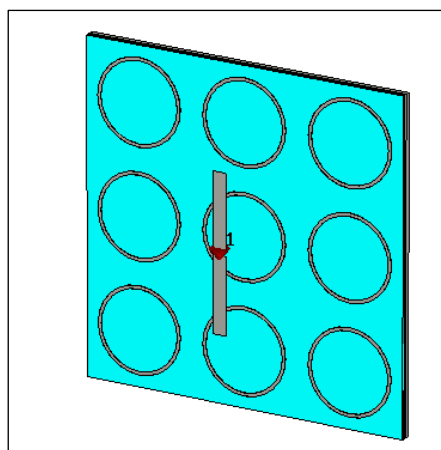


Figura 4.61: conjunto dipolo-plano de masa 3x3 con metalización de anillos superpuestos en diferentes sustratos

4.5.3.1 Nivel de adaptación

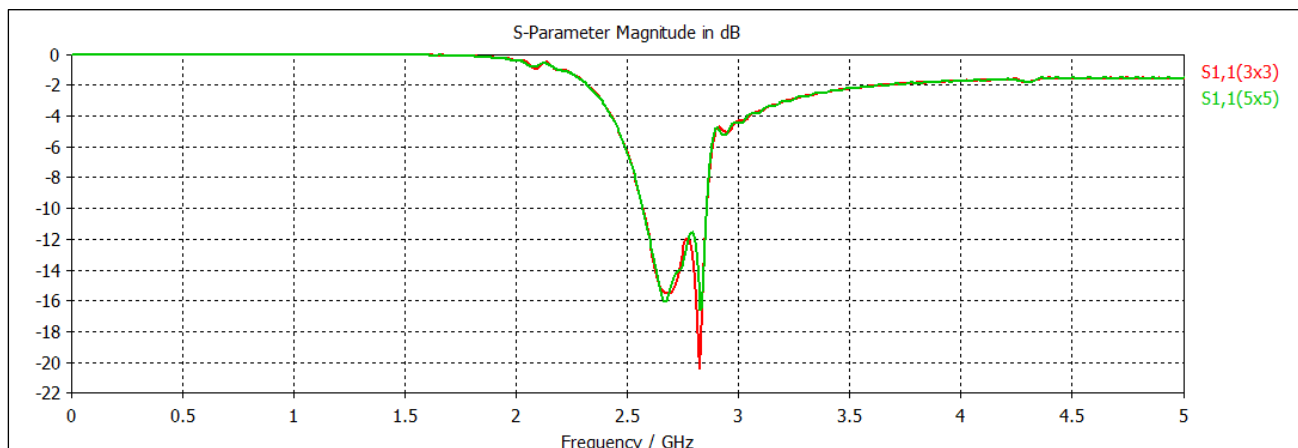


Figura 4.62: Comparación del nivel de adaptación del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos.

En este caso viendo los resultados de la figura 4.62 vemos que son bastante similares a los obtenidos para el plano 5x5, incluso a la frecuencia de resonancia mayor obtenemos menos pérdidas de retorno. La variación de las frecuencias de resonancia y de los anchos de banda son mínimas, por lo que a priori parecen buenos resultados a falta de ver los diagramas de radiación.

4.5.3.2 Diagramas de radiación

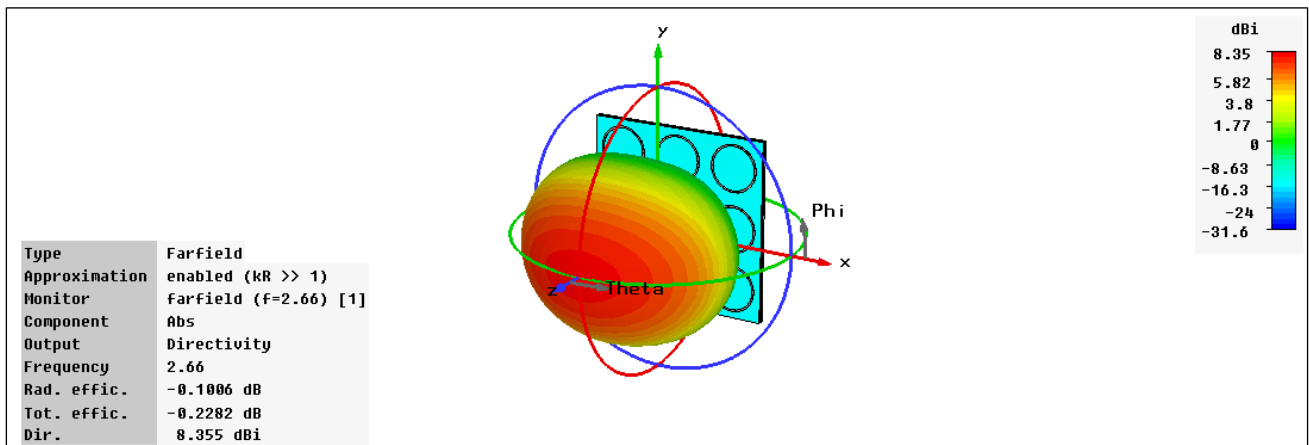


Figura 4.63: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.66 GHz

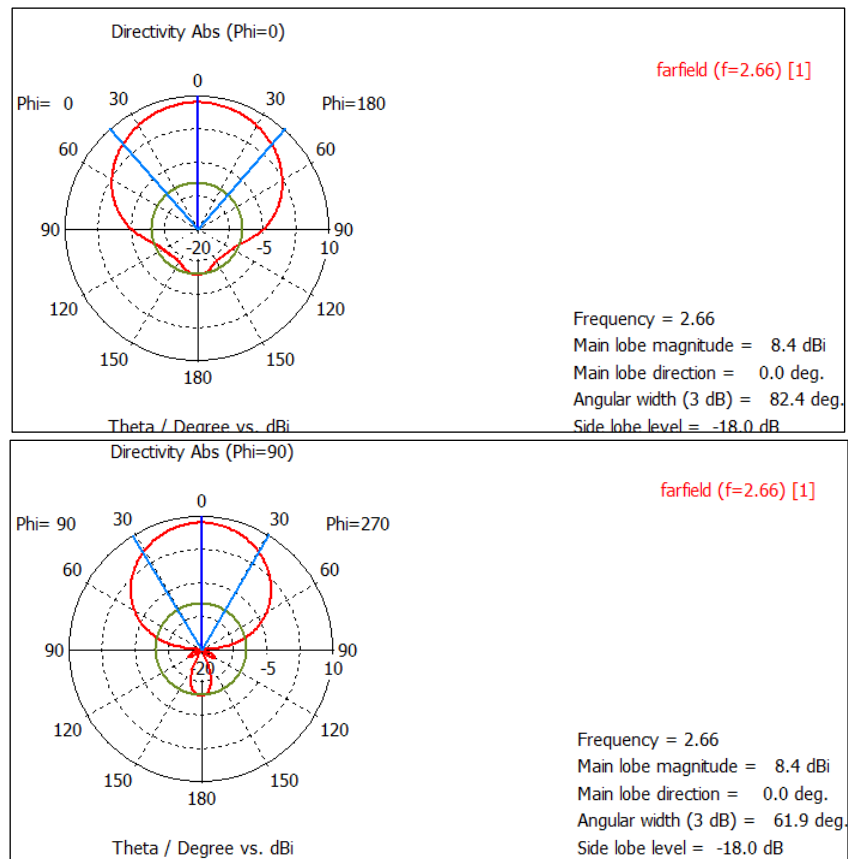


Figura 4.64: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.66 GHz

En las figuras 4.63 y 4.64 se muestra el diagrama de radiación a la frecuencia de 2.66 GHz. Haciendo una comparación entre estos resultados y los obtenidos anteriormente para el plano de 5x5 vemos que obtenemos unos valores muy similares tanto de directividad como de anchura de haz, resultados de hecho bastante lógicos cuando vimos que el nivel de adaptación para ambos planos a esa frecuencia era prácticamente idéntico.

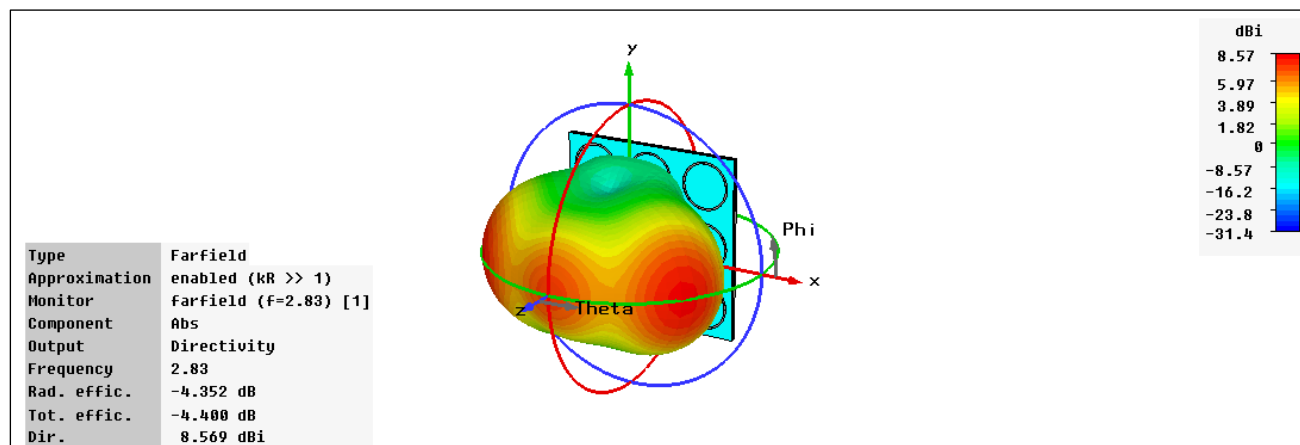


Figura 4.65: Diagrama de radiación 3D del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.83 GHz

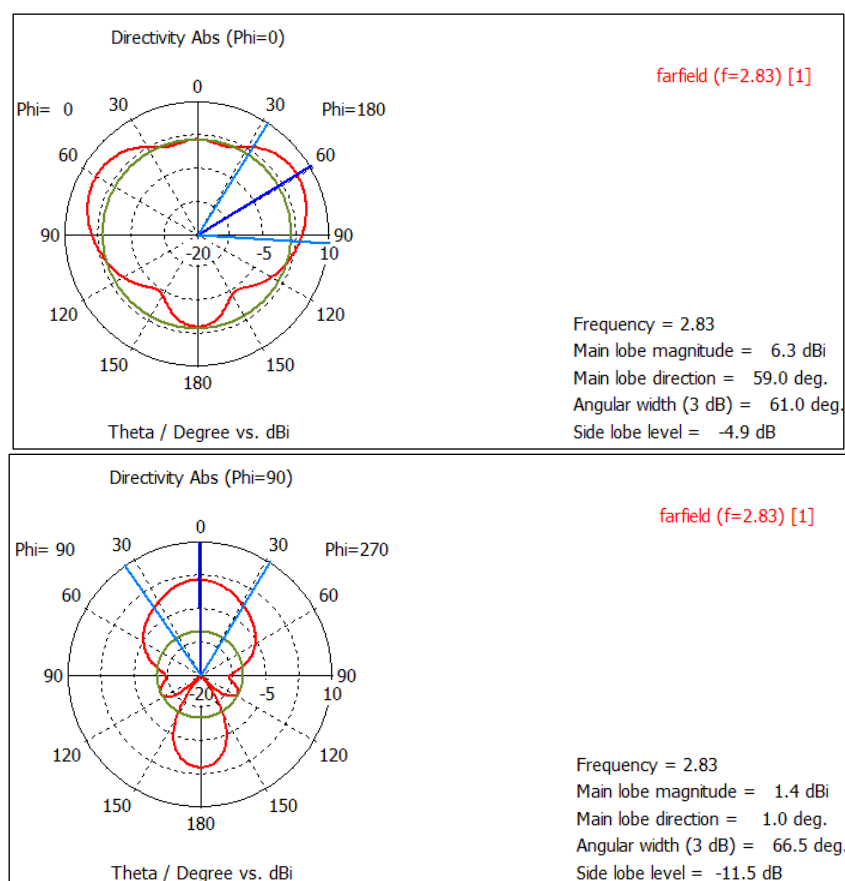


Figura 4.66: Diagramas polares correspondientes a los cortes $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$ del dipolo de tamaño 0.30λ colocado a 15 mm sobre el plano de masa 3x3 con metalización de dos anillos superpuestos en diferentes sustratos para una frecuencia de 2.81 GHz

En este caso aunque vemos en la figura 4.65 un diagrama de radiación irregular, si comparamos los datos obtenidos con los del plano 5x5 vemos que son muy similares las directividades y los anchos de haz. Podemos decir que son resultados buenos ya que siguen sin aparecer niveles de radiación trasera y los lóbulos secundarios que hay son despreciables al considerarse parte del lóbulo principal.

4.5.4 Conclusión

En vista de los resultados obtenidos al quitar los anillos exteriores del plano vemos que la influencia de los mismos sobre la radiación de la antena es muy pequeña, pudiéndose reducir el plano sin mayor problema en la fabricación de la antena. Estos resultados ya los intuíamos cuando mostramos las imágenes de cómo se distribuía el campo eléctrico en el plano para cada una de las metalizaciones y veíamos que la mayor amplitud se daba en los anillos centrales más cercanos a donde estaba el dipolo.

Capítulo 5.

Resultados experimentales

5.1 Introducción

Hasta esta parte del proyecto nos hemos centrado en la simulación mediante el software CST Microwave Studio del dipolo y de su influencia en los planos de masa artificiales. En este capítulo intentaremos comparar los resultados teóricos obtenidos tras las simulaciones con las medidas obtenidas en el laboratorio con la antena física, construida con las medidas con las que mejores resultados obtuvimos en simulación.

Hemos dividido el capítulo en dos partes, en la primera describimos las características de los materiales y las dimensiones finales de nuestro diseño en cada uno de nuestros modelos a analizar en el laboratorio. En la segunda, se muestran las medidas tomadas en el laboratorio, comparándolas con los resultados teóricos obtenidos mediante el software de simulación.

5.2 Implementación de los diseños

En capítulos anteriores vimos la utilidad y buenos resultados de los planos de masa artificiales a la hora de diseñar antenas de bajo perfil, contrariamente a los resultados de un plano de masa metálico. Estudiamos tres planos de masa con diferentes metalizaciones utilizando la misma antena, el dipolo. Las dimensiones y posiciones de los distintos elementos a lo largo de todo el proyecto se calcularon para que el dipolo tuviera una frecuencia de trabajo de 2 GHz y un nivel de adaptación máximo.

En principio, podríamos estudiar y fabricar en este capítulo tres modelos distintos, sin embargo, como pudimos ver los resultados tanto en la metalización de dos anillos concéntricos como en aquella en la que teníamos dos anillos superpuestos en distintos sustratos, eran muy similares, por tanto nos hemos decantado por hacer solo el modelo de dos anillos concéntricos apoyados en el mismo sustrato, junto con el de un anillo simple.

5.2.1 Materiales y tecnología de fabricación

A lo largo del proyecto hemos ido definiendo en los diferentes modelos estudiados tanto las dimensiones como los materiales que conforman el conjunto plano de masa artificial y dipolo. Dichos valores son los que resumiremos a continuación y serán los utilizados para la implementación de cada uno de ellos.

Como explicamos anteriormente en anteriores capítulos, algunos valores como el grosor tanto del sustrato, metalizaciones y plano de masa metálico, corresponden a dimensiones estándar de los materiales disponibles en laboratorio para fabricar los distintos planos. Concretamente los materiales utilizados son los siguientes:

- Sustrato

Hemos utilizado un sustrato Duroid 5880, el cual tiene un espesor de 0.787mm. Tiene una permitividad relativa de 2.2 y una tangente de pérdidas muy baja de 0.0009.

- Plano metálico

Hemos usado un aluminio de 1.5mm de espesor. Es el material más usado para este tipo de fabricaciones. Tiene peor conductividad que otros materiales, pero suficiente para utilizarse de plano de masa, además de tener un menor precio.

- Metalizaciones

Las metalizaciones utilizadas en la implementación de los anillos tendrán un espesor de 27 μ m y será de cobre.

- Dipolo

El dipolo se ha construido con el mismo material utilizado en la construcción de las metalizaciones.

5.2.2 Dimensiones y especificaciones de los modelos a implementar

Este apartado recoge el esquema final de nuestra antena alimentada con el balun, sobre el plano de masa artificial con sus dimensiones finales y toda la información necesaria para la implementación de los dos modelos estudiados.

5.2.2.1 Dipolo alimentado con balun sobre plano de masa artificial con metalización de anillos simples

Como vimos en el capítulo para adaptar la línea de alimentación coaxial desbalanceada a la antena balanceada debemos colocar un balun entre la antena y la conexión de alimentación. En cuanto al plano de masa artificial en el anterior capítulo vimos que un buen tamaño para el mismo es en el que teníamos 9 anillos, ya que seguíamos consiguiendo resultados óptimos de adaptación. El esquema de cómo quedaría nuestro conjunto, se muestra en la Figura 5.1:

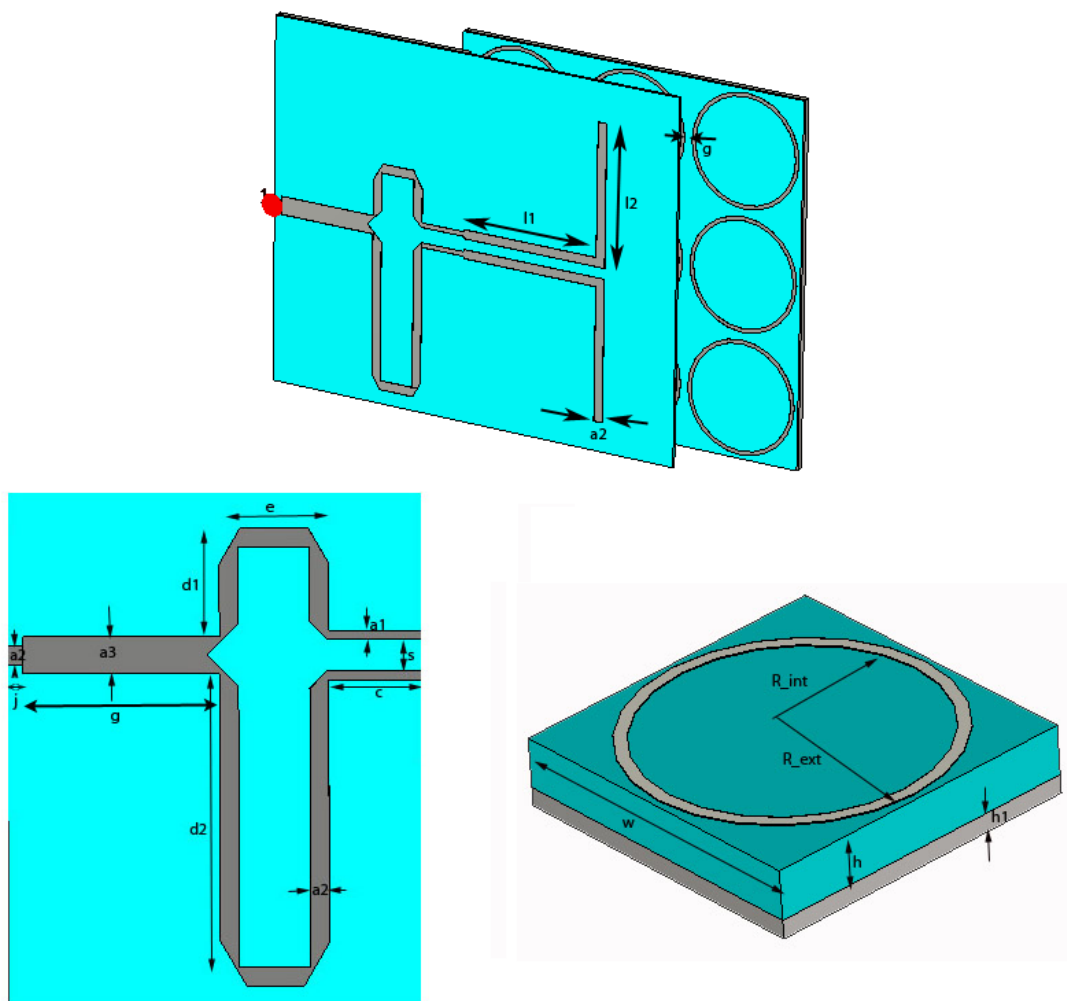


Figura 5.1: Esquema dipolo alimentado con balun sobre plano de masa artificial con metalización en anillo

A continuación, vamos a calcular qué valor de la longitud del dipolo y a qué altura debemos colocarlo para que se adecúe más a la frecuencia de resonancia con la que llevamos trabajando durante todo el proyecto (2GHz), para ello hemos simulado varias alturas desde 2mm a 15mm, y con diferentes longitudes del dipolo.

- $A=2\text{mm}$

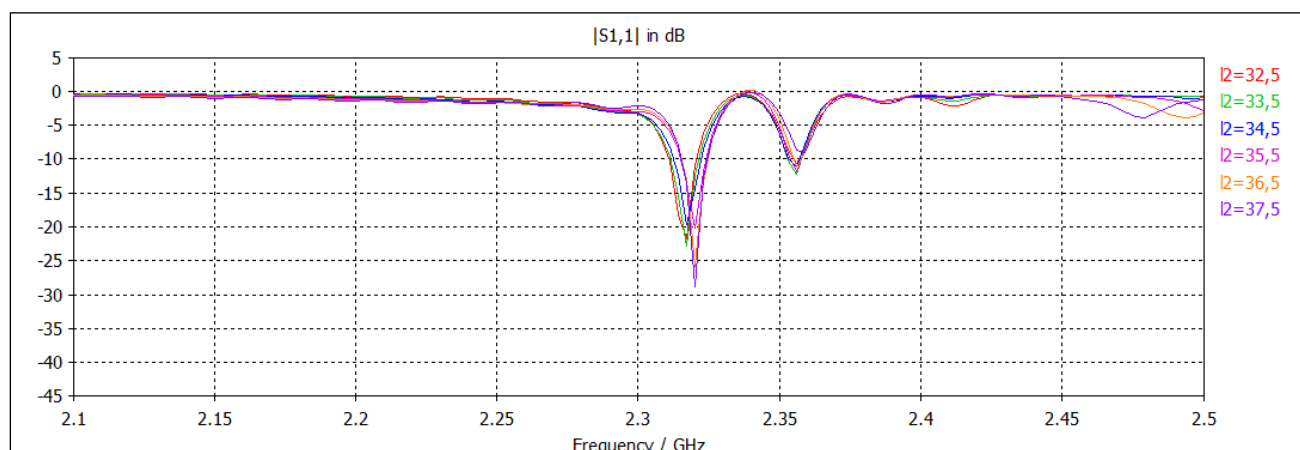


Figura 5.2: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 2mm

- $A=4\text{mm}$

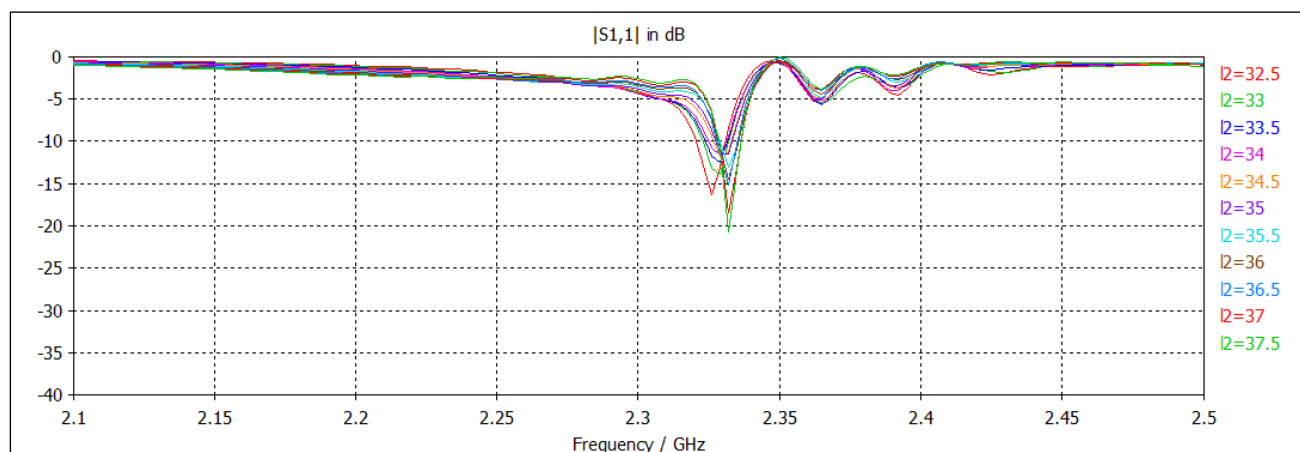


Figura 5.3: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 4mm

- Altura $A=5\text{mm}$

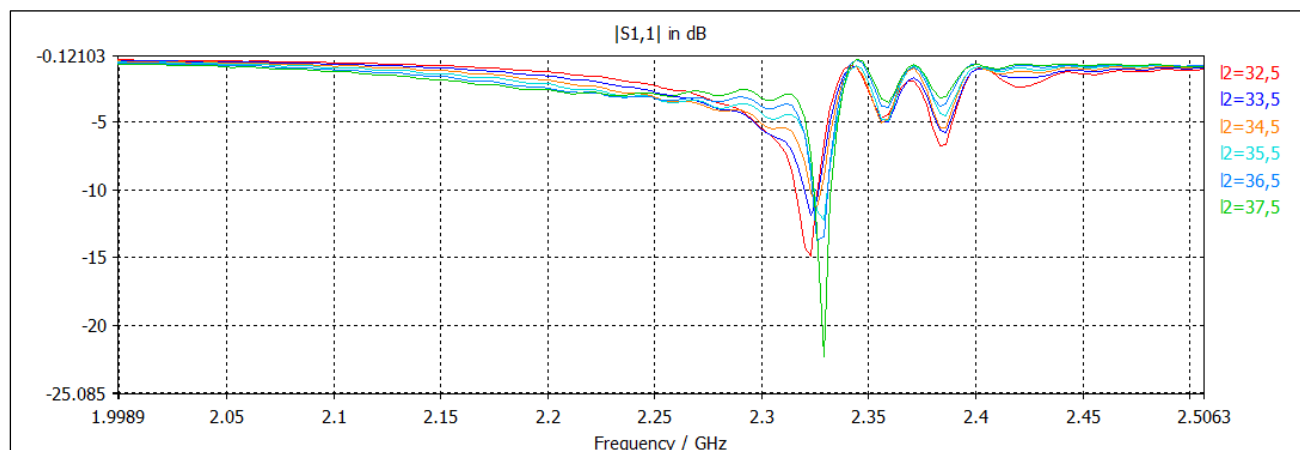


Figura 5.4: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 5mm

- Altura A=7mm

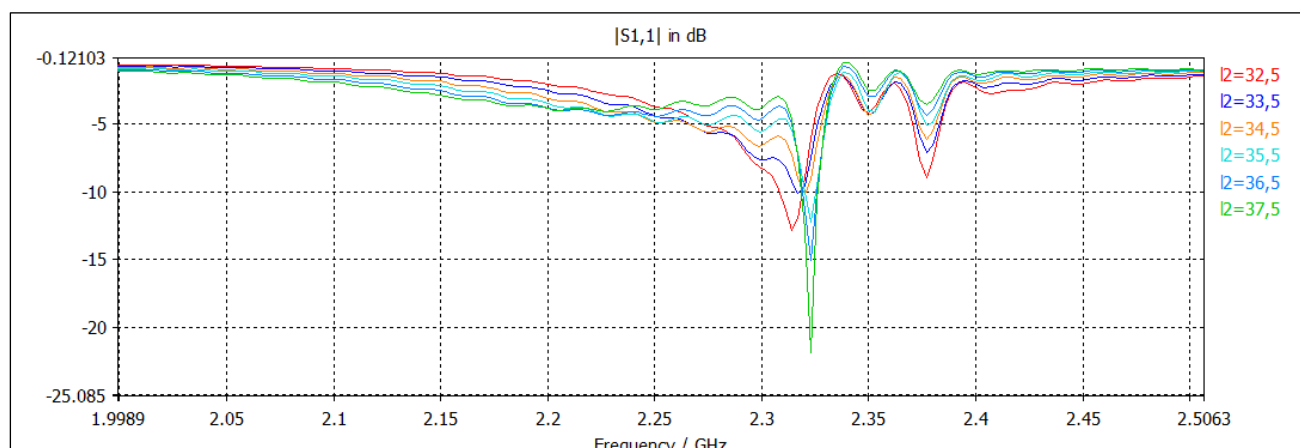


Figura 5.5: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 7mm

- Altura A=9mm

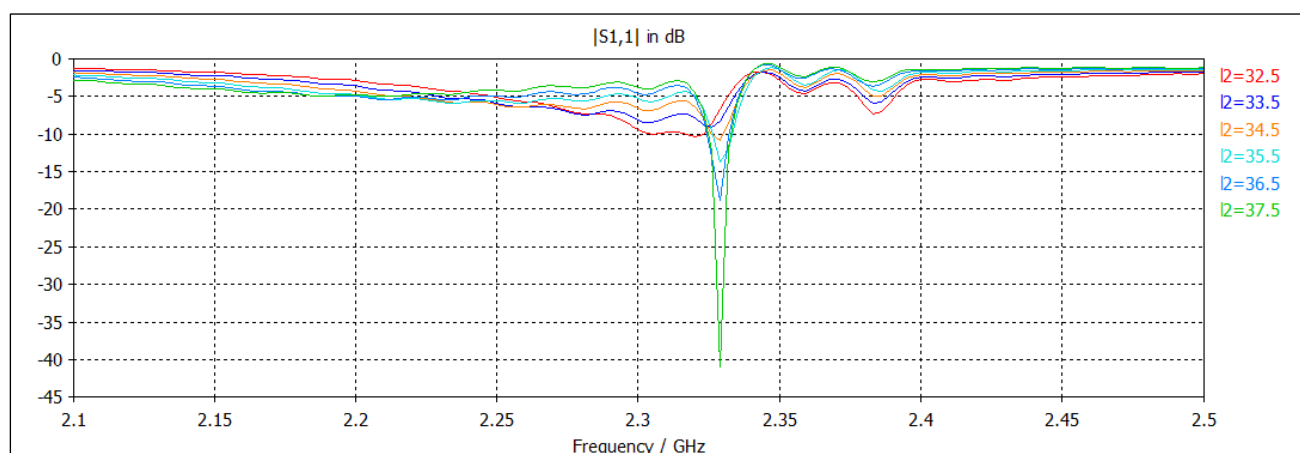


Figura 5.6: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 9mm

- Altura A=11mm

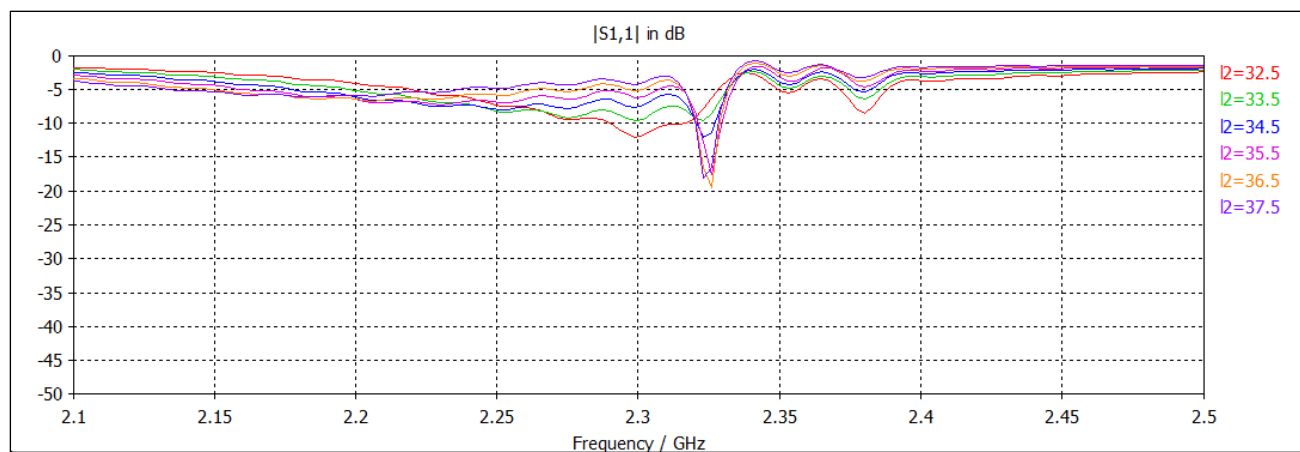


Figura 5.7: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 11mm

- Altura $A=13\text{mm}$

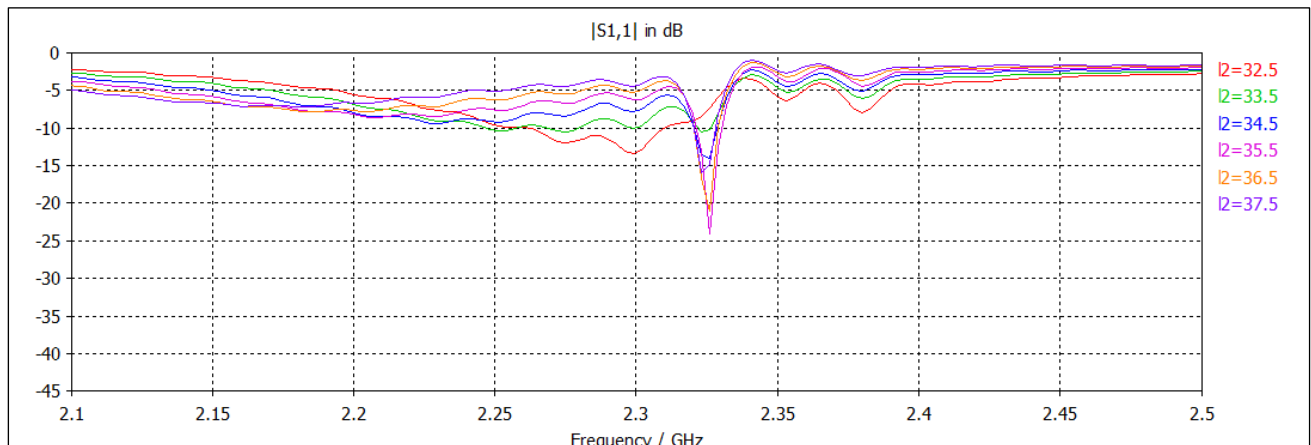


Figura 5.8: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 13mm

- Altura $A=15\text{mm}$

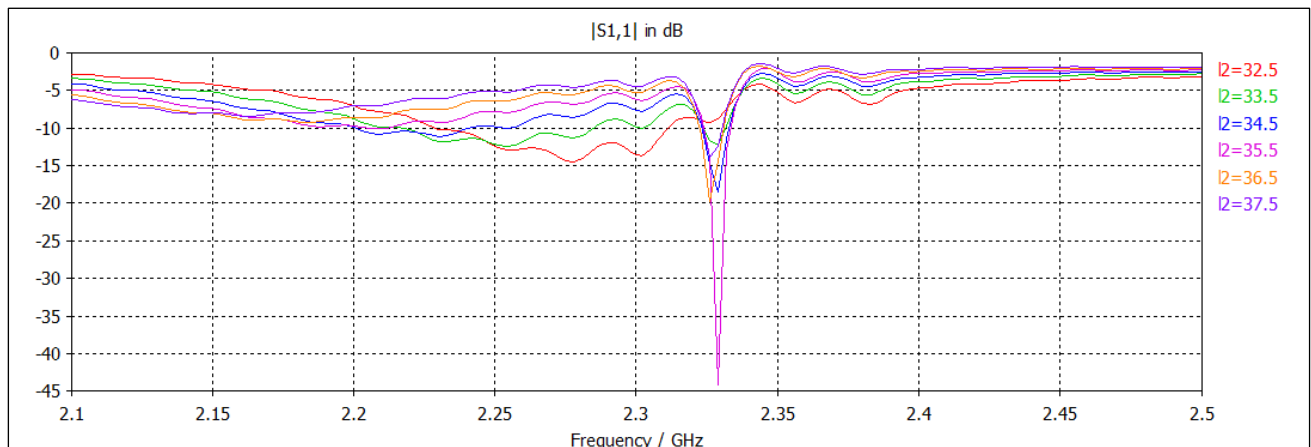


Figura 5.9: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 15mm

Como vemos en las figuras la presencia del balun entre el conector y el dipolo permite obtener mejores resultados de adaptación para alturas menores entre la antena y el plano, siendo la longitud de $l_2=37.5\text{mm}$ con la que tenemos menores pérdidas de retorno en la mayoría en valores bastante inferiores a -20dB . La altura que mejores resultados obtienen es aquella en la que tenemos 9mm entre el dipolo y el plano de masa, siendo las pérdidas de retorno en este caso de aproximadamente -40dB , sin embargo también podemos ver que para las alturas menores también se obtienen buenos resultados, siendo en $A=2\text{mm}$ el nivel de adaptación cercano a los -28dB para la longitud de $l_2=37.5\text{mm}$. Por tanto como lo que buscamos es el bajo perfil de nuestro diseño nos quedaremos con esta altura.

A continuación en la Tabla 5.1 se recogen todos los valores para el diseño del conjunto.

Características de la estructura			
	Referencia	Referencia figura	Valor
Anillo	Radio externo	R_ext	15 mm
	Radio interno	R_int	14 mm
	Espesor anillo	-	0.027 mm
	Separación entre anillos	g	2 mm
Sustrato	Ancho celda unidad	w	32 mm
	Espesor	h	1.78 mm
	Material	-	Polietileno ($\epsilon_r = 2.2$)
Plano de masa	Espesor	h1	1.5 mm
	Material	-	Aluminio
Dipolo	Longitud mitad	l2	37.5 mm
	Brazo unión balun	l1	37.5 mm
	Ancho brazo	a2	4 mm
	Espesor	-	0.027 mm
Balun	Ancho brazos	a1	1.2 mm
		a2	2.4 mm
		a3	4.8 mm
	Longitud brazos	c	12 mm
		d1	12 mm
		d2	38.5 mm
		e	14.02 mm
		g	26.5 mm
		j	2 mm
	Separación brazos	s	4 mm

Tabla 5.1: Valores esquema dipolo alimentado con balun sobre plano de masa artificial con metalización en anillo

5.2.2.2 Dipolo alimentado con balun sobre plano de masa artificial con metalización de dos anillos concéntricos

En este próximo apartado procederemos de la misma forma para analizar el plano con la metalización de dos anillos concéntricos. Igualmente que en el caso anterior y como vimos en el pasado capítulo el plano tendrá un tamaño de 3x3 anillos, que equivale a un cuadrado de 96mm de lado.

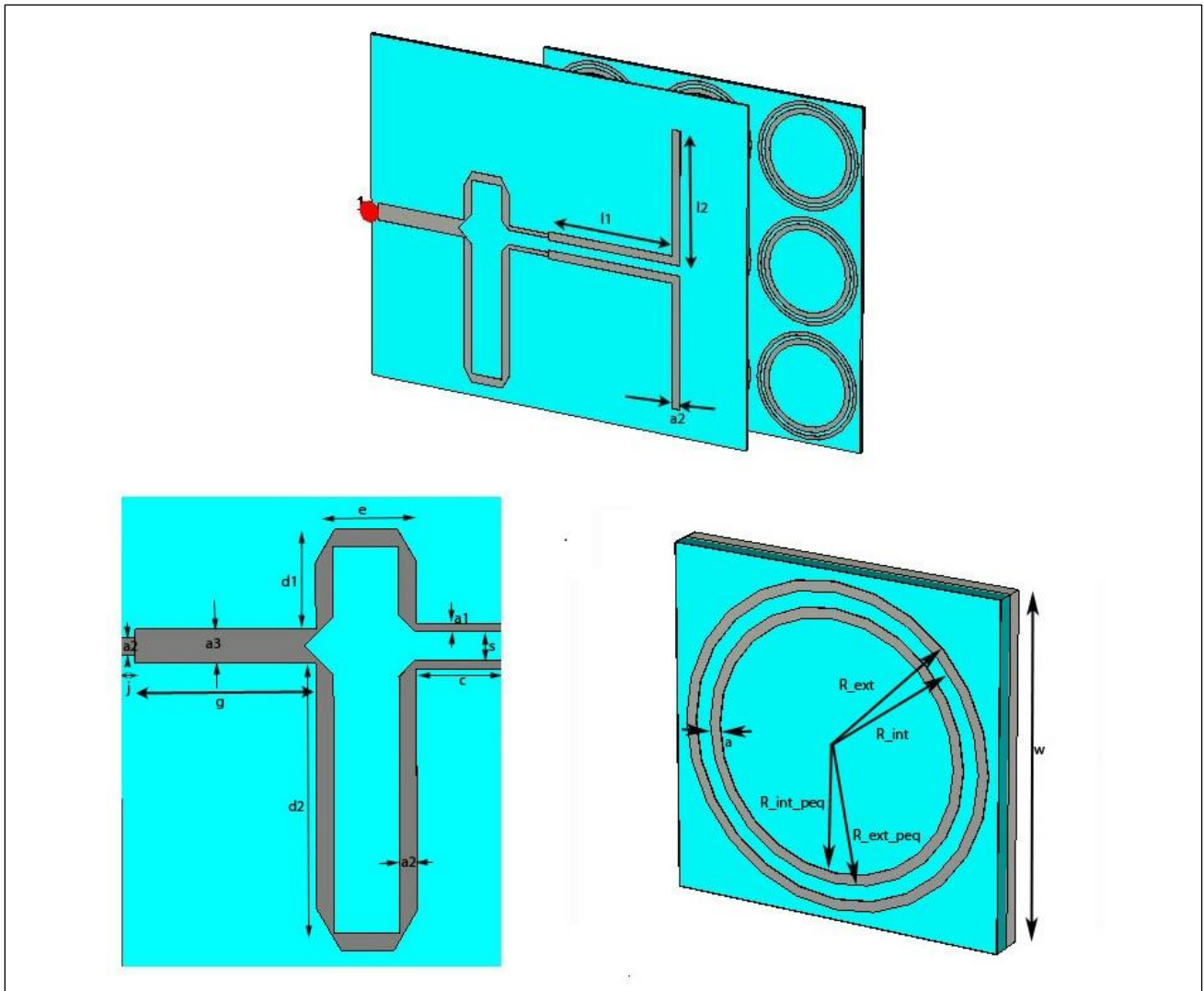


Figura 5.10: Esquema dipolo alimentado con balun sobre plano de masa artificial con metalización en anillo

De la misma forma que para la anterior metalización procederemos a calcular tanto la longitud del dipolo como a la altura que debe colocarse el mismo. Para ello simularemos basándonos en los mejores resultados del anterior apartado a unas alturas de entre 2 y 8 mm, para varias longitudes del dipolo entre 32.5mm y 37.5mm y comprobaremos con cuál de ellas conseguimos menores pérdidas de retorno en la antena, para las dos frecuencias de resonancia a las cuales vimos trabajaba la antena cuando lo colocábamos sobre este plano con metalización de dos anillos concéntricos.

- A=2mm

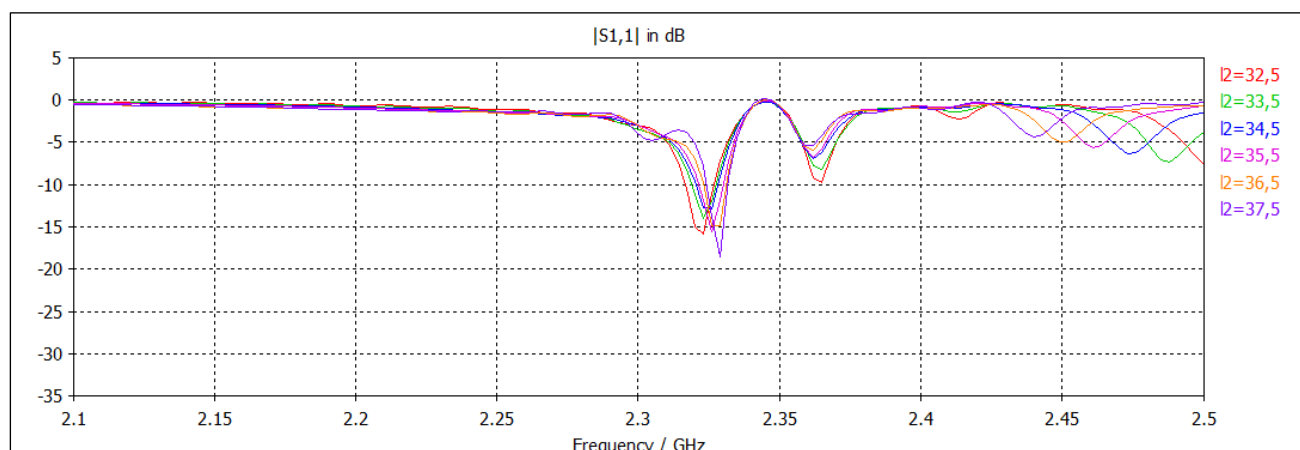


Figura 5.11: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 2mm

- Altura A=3mm

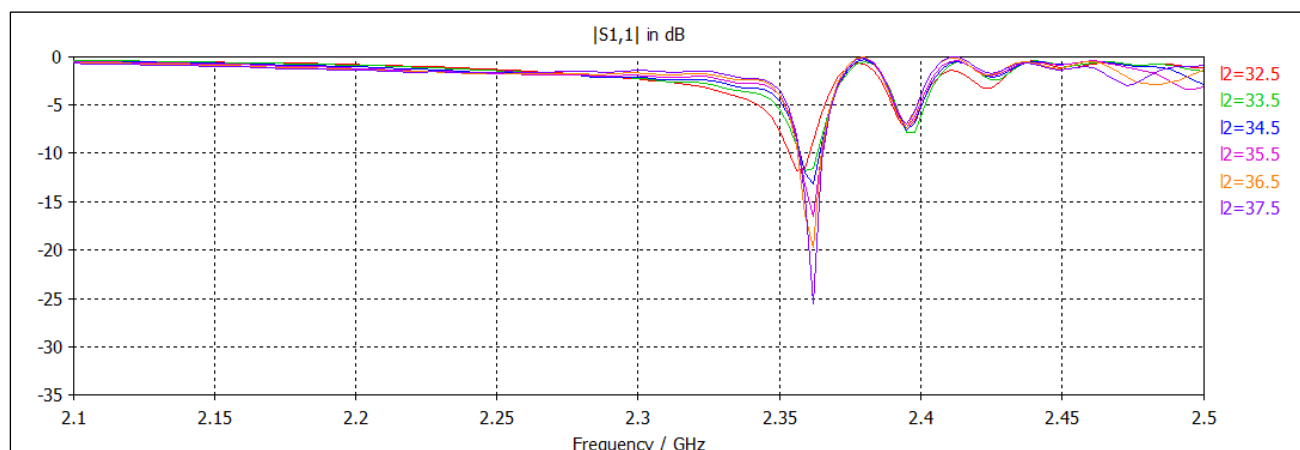


Figura 5.12: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 3mm

- Altura A=4mm

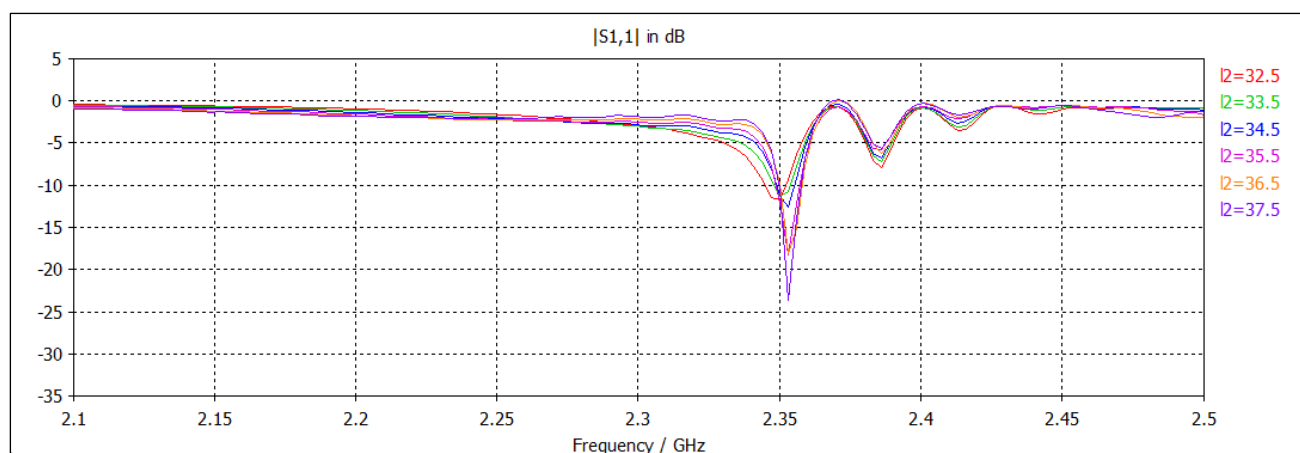


Figura 5.13: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 4mm

- Altura A=5mm

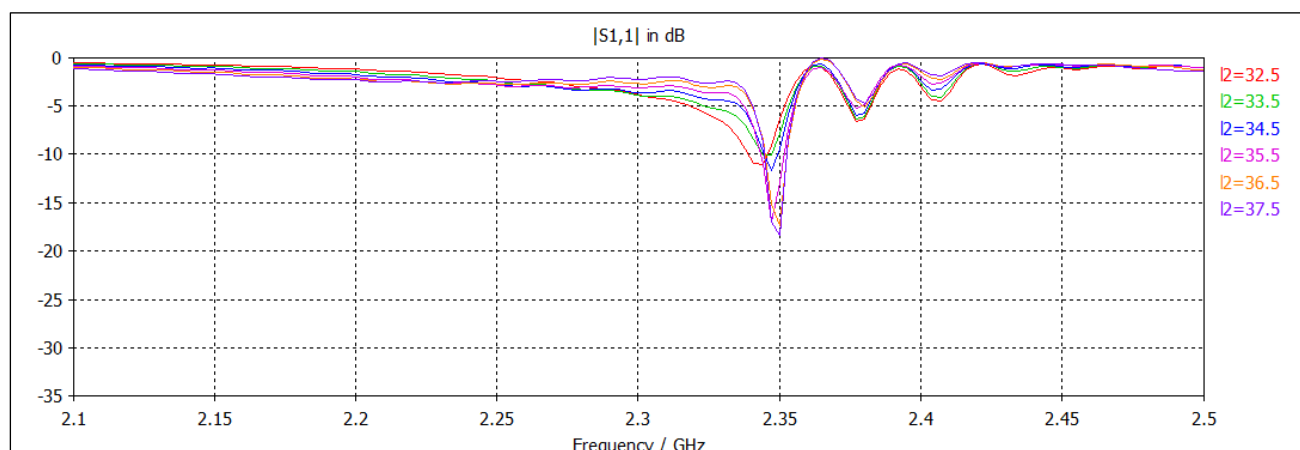


Figura 5.14: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 5mm

- Altura A=6mm

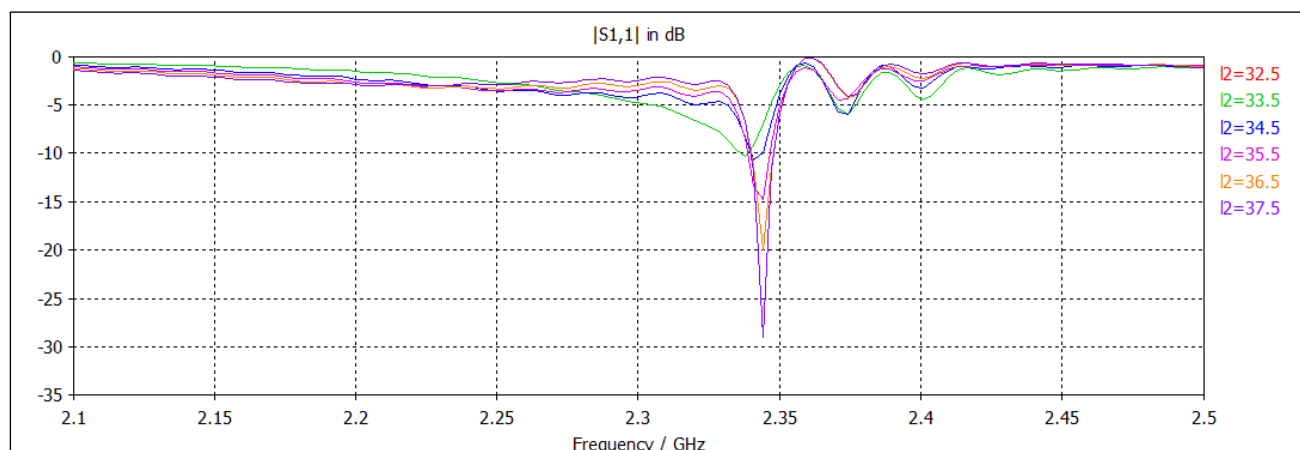


Figura 5.15: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 6mm

- Altura A=7mm

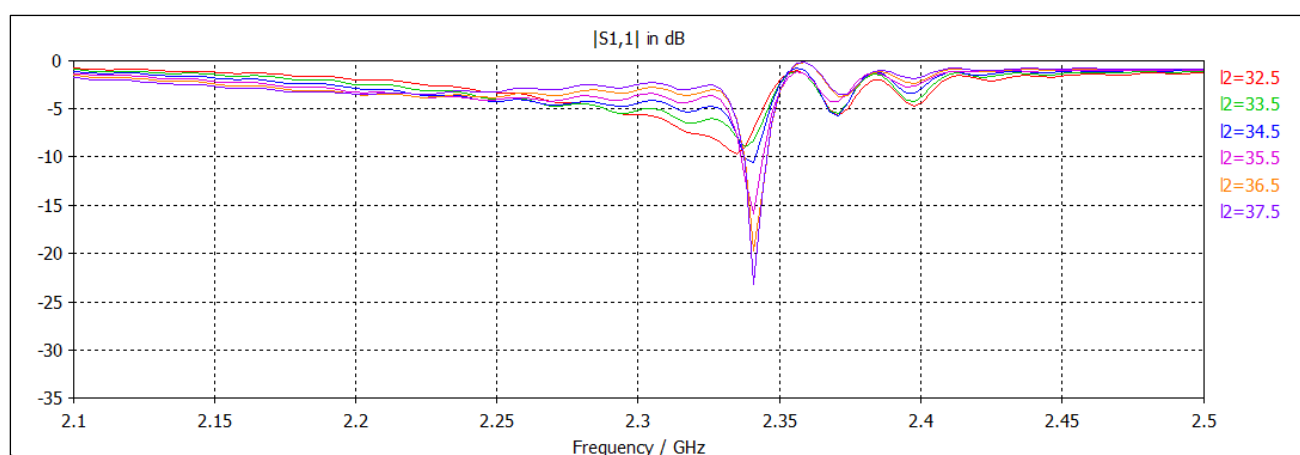


Figura 5.16: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 7mm

- Altura $A=8\text{mm}$

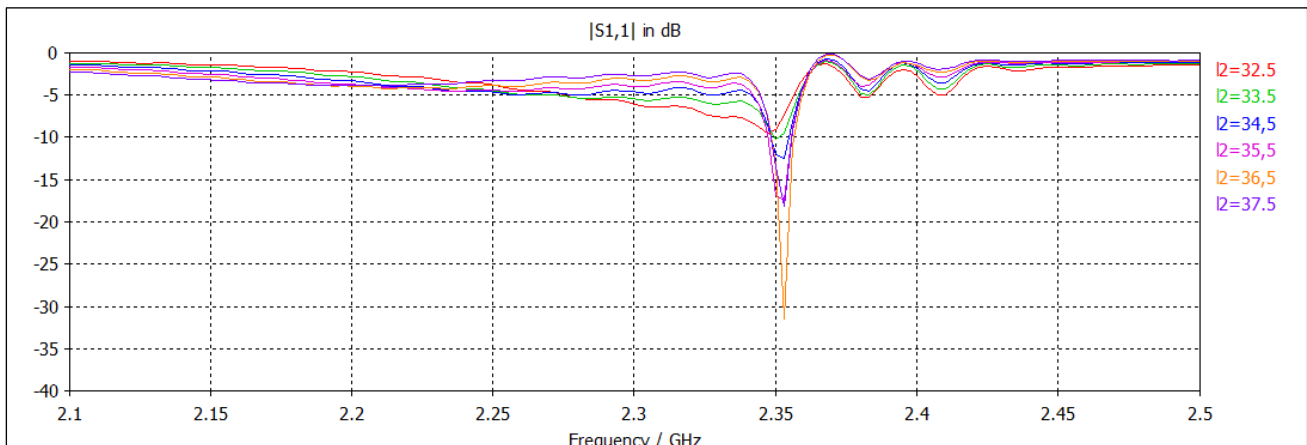


Figura 5.17: Nivel de adaptación para diferentes longitudes del dipolo a una altura de 8mm

Igual que sucedía en el caso de la metalización con anillo simple, los mejores resultados los obtenemos cuanto menor distancia al plano de masa tenemos. Sin embargo no hemos obtenido ninguna altura a la cual consigamos que las dos frecuencias de resonancia estén adaptadas. En 2mm obtenemos los mejores resultados pero como decimos sólo conseguimos adaptación a la frecuencia menor.

El objetivo de incluir un anillo concéntrico al que ya teníamos en el apartado anterior era conseguir una segunda frecuencia de trabajo cercana a la que ya teníamos para así poder aumentar el ancho de banda de la antena. Sin embargo como vemos no obtenemos ningún pico de frecuencia cercano a 2.3 GHz que es donde aproximadamente teníamos en el caso anterior y seguimos teniendo en este caso. Debido a ello para el diseño en el laboratorio se ha decidido tomar las mismas dimensiones para el dipolo que en el caso anterior y hacer variaciones de la altura para intentar conseguir resultados más adecuados con la antena física.

A continuación en la Tabla 5.2 se recogen todos los valores para el diseño del conjunto.

Características de la estructura			
Anillos	Referencia	Referencia figura	Valor
	Radio externo	R_ext	15 mm
	Radio interno	R_int	14 mm
	R.Externo pequeño	R_ext_peq	13 mm
	R.Interno pequeño	R_int_peq	11.5 mm
	Espesor anillo	-	0.027 mm
	Separación entre anillos	g	2 mm
Sustrato	Ancho celda unidad	w	32 mm
	Espesor	h	1.78 mm
	Material	-	Polietileno ($\epsilon_r = 2.2$)
Plano de masa	Espesor	h1	1.5 mm
	Material	-	Aluminio
Dipolo Dipolo	Longitud mitad	l2	37.5 mm
	Brazo unión balun	l1	37.5 mm
	Ancho brazo	a2	4 mm
	Espesor	-	0.027 mm
Balun	Ancho brazos	a1	1.2 mm
		a2	2.4 mm
		a3	4.8 mm
	Longitud brazos	c	12 mm
		d1	12 mm
		d2	38.5 mm
		e	14.02 mm
		g	26.5 mm
		j	2 mm
	Separación brazos	s	4 mm

Tabla 5.2: Valores esquema dipolo alimentado con balun sobre plano de masa artificial con metalización de dos anillos concéntricos

5.3 Medidas en el laboratorio

Una vez tenemos las medidas y montamos nuestra antena, procedemos a realizar las mediciones en el laboratorio con el fin de compararlas con las de la simulación mediante el software CST Microwave 2010. Para las mediciones se ha utilizado un analizador vectorial de redes como el mostrado en la Figura 5.18, con el cual podemos medir los parámetros S(en este caso S11), que posteriormente hemos representado en la graficas utilizando el software Matlab R2009b.

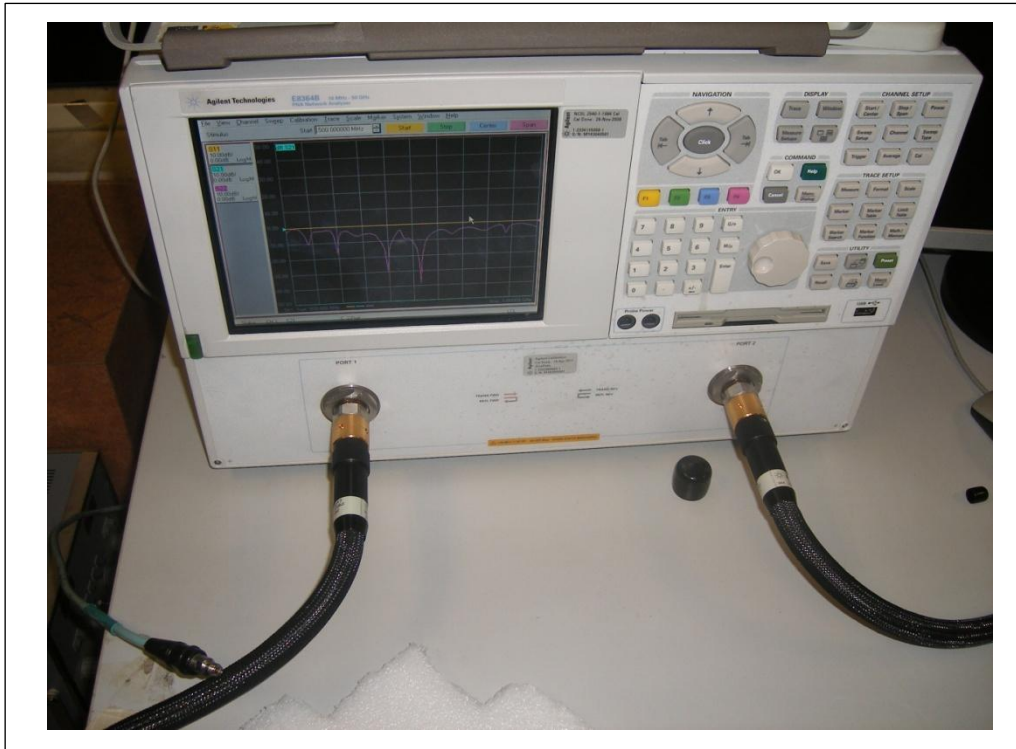


Figura 5.18: Imagen del analizador vectorial de redes utilizado para las mediciones

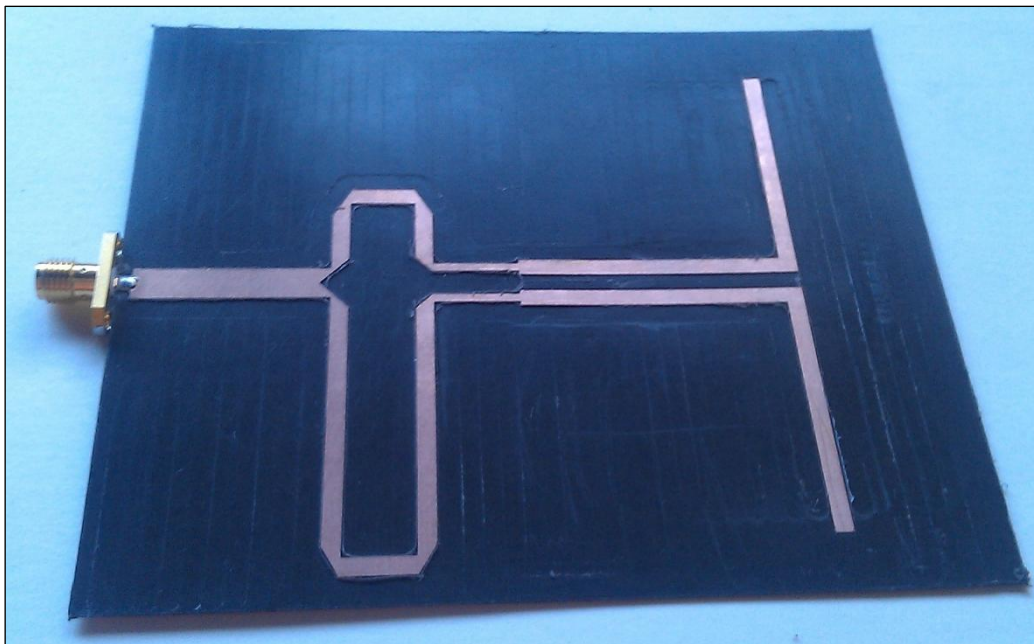


Figura 5.19: Imagen del dipolo y el balun

5.3.1 Medidas del dipolo con balun en vacío y sobre plano metálico

De los modelos construidos se medirá el nivel de adaptación de cada uno de ellos. Primeramente y con el objetivo de tenerlo como referencia, se tomaran dos medidas primero el nivel del dipolo sin un plano debajo en condiciones similares a las del vacío y segundo con un plano metálico debajo.

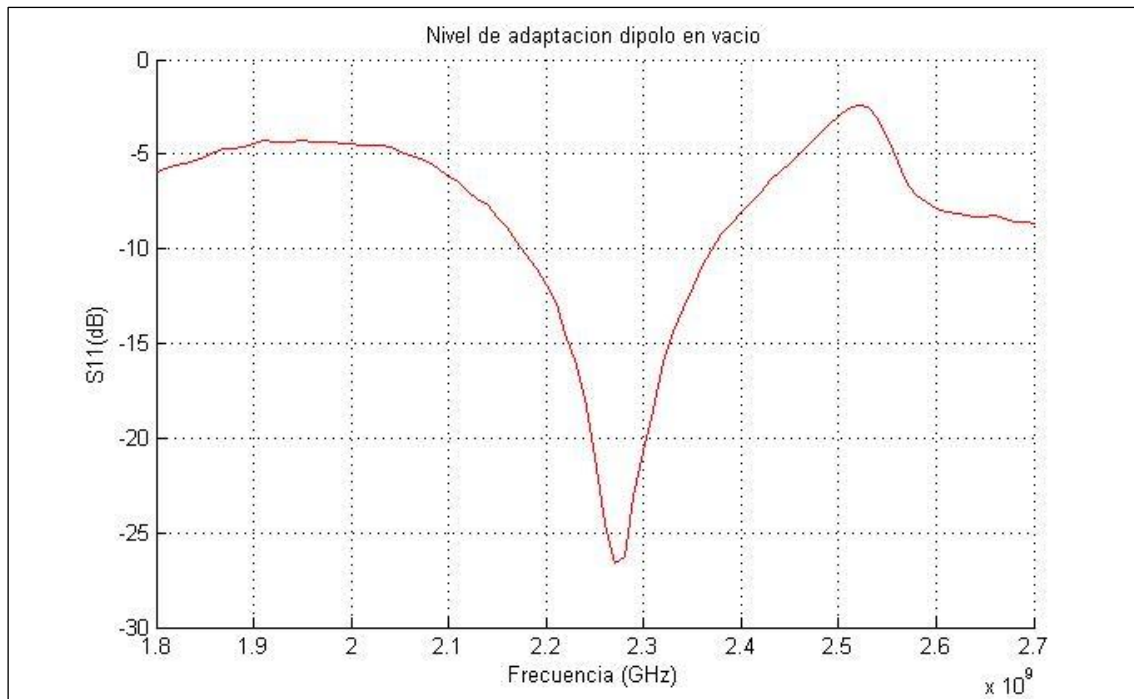


Figura 5.20: Medida del nivel de adaptación S11(dB) del dipolo en vacío

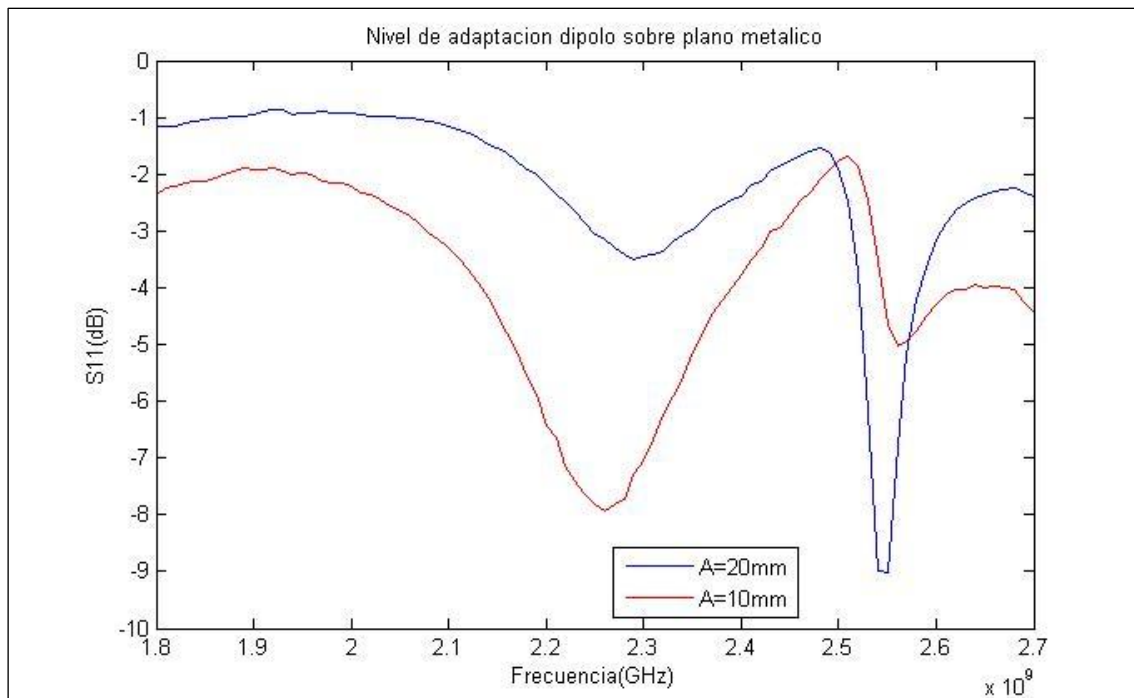


Figura 5.21: Medida del nivel de adaptación S11(dB) del dipolo sobre plano metálico

Como se puede observar en la Figura 5.19 el nivel de adaptación en condiciones similares al vacío es bueno, teniendo el dipolo unas pérdidas de retorno inferiores a -25dB y un ancho de banda de aproximadamente 180MHz, lo cual si lo comparamos con la Figura 4.16 en la que se mostraban los resultados de simulación, podemos ver que el ancho de banda se ha reducido en unos 40 MHz, sin embargo hemos conseguido unas menores pérdidas de retorno.

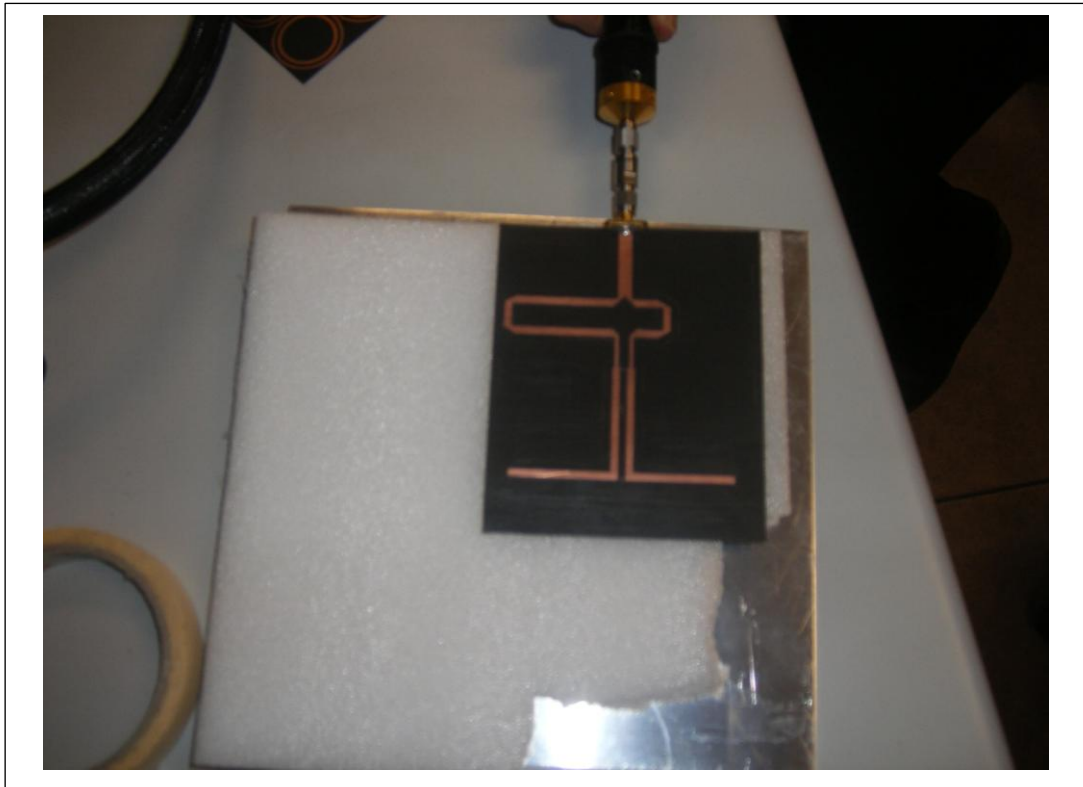


Figura 5.22: Medida del dipolo sobre plano metálico

En la Figura 5.20 mostramos los resultados al realizar las mediciones sobre un plano metálico, y como vemos se obtienen mejores resultados de lo esperado, ya que lo lógico era encontrarnos con una peor adaptación, aunque sin embargo se obtienen similares resultados a los de la Figura 4.16. También para decir si estos resultados son buenos o malos hemos de compararlos con aquellos en los que medimos cerca de los planos de masa artificiales diseñados en este proyecto que se presentan a continuación.

5.3.2 Medidas del dipolo con balun sobre plano con metalización de anillos simples

El primer caso a estudiar es el plano diseñado con metalización de anillos simples. Las mediciones se harán de la misma forma que hicimos en la simulaciones (véase Figura 5.1), es decir con el dipolo situado sobre justo el centro del plano de masa.

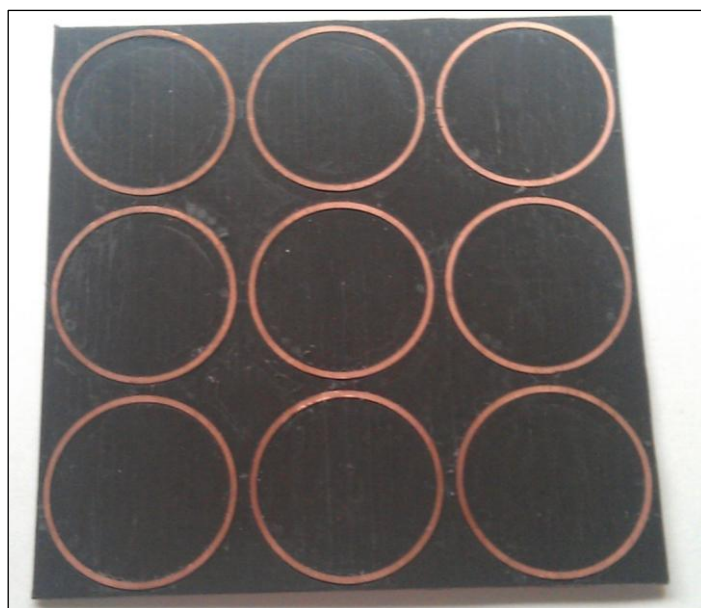


Figura 5.23: Plano con metalización de anillos simples

Se han realizado medidas a cuatro alturas representativas entre 2mm y 11mm. Los resultados se muestran en la Figura 5.23.

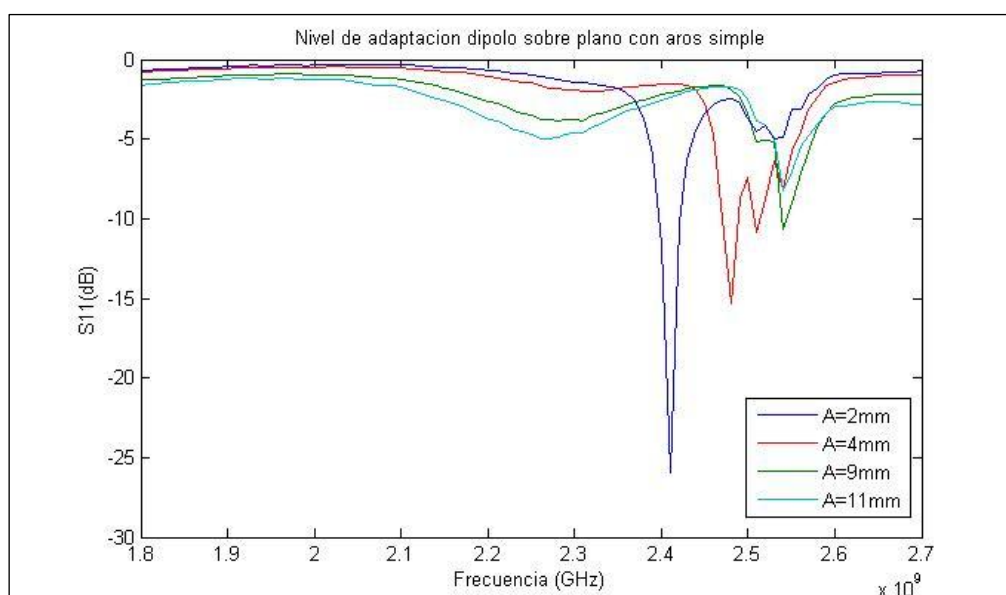


Figura 5.24: Nivel de adaptación S11(dB) para diferentes alturas sobre plano con metalización de anillos simples

Podemos ver que ha habido un pequeño desplazamiento de las frecuencias de resonancia a frecuencias mayores. Como vemos salvo a la altura $A=11$ mm, en las otras tres conseguimos que la antena este adaptada ya que las pérdidas de retorno son menores a -10dB. Resulta claro que los mejores datos los obtenemos con la distancia más cercana, lo cual es importante ya que lo que buscamos siempre es el bajo perfil.

Si comparamos los resultados obtenidos con los de la simulación vemos que el nivel de adaptación es prácticamente el mismo, cercano a -28dB al igual que el del ancho de banda que también tiene valores similares.

5.3.3 Medidas del dipolo con balun sobre plano con metalización de anillos concéntricos

El otro diseño que hemos hecho es el plano de masa artificial con una metalización de dos anillos concéntricos. Al igual que en las simulaciones (Véase Figura 5.10) y en el caso anterior, el dipolo irá situado justo sobre el centro del plano de masa.



Figura 5.25: Plano con metalización de dos anillos concéntricos

Hemos tomado cuatro medidas representativas, entre la más pequeña de 2mm y la mayor de 11 mm. Y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.25

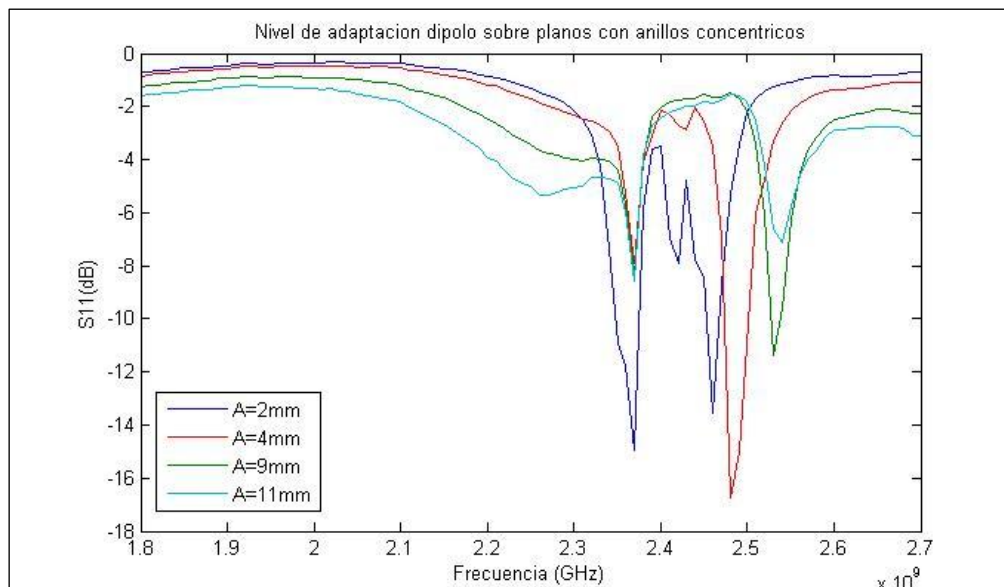


Figura 5.26: Nivel de adaptación S_{11} (dB) para diferentes alturas sobre plano con metalización de dos anillos concéntricos

Si recordamos el apartado 5.2.2.2 veíamos que en simulación no teníamos ninguna altura en la que obtuviésemos un nivel de adaptación aceptable para las dos frecuencias de resonancia. Sin embargo las mediciones sobre 2mm en la antena real, nos dan unos resultados bastante buenos en el nivel de adaptación en las dos frecuencias de resonancia (-15dB y -13.5dB) que se sitúan en torno a 2.38GHz y 2.46GHz. Por tanto en este caso podemos decir que los resultados reales son mejores que los de simulación.

Capítulo 6.

Conclusiones y líneas futuras

6.1 Conclusiones

Para concluir con el proyecto se redactan en este apartado las conclusiones finales que se han deducido durante los capítulos anteriores.

En el primer capítulo indicábamos las motivaciones que impulsaron al inicio de este proyecto y estas eran el comprobar las numerosas ventajas de los planos de masa artificiales y el diseño particular de un plano de masa basado en una estructura plana y con una metalización circular que da lugar a una geometría simétrica y tratar de conseguir que estos planos sean de banda ancha o de doble banda utilizando dos anillos. Estos planos de masa se utilizarán en conjunto con una antena impresa de tipo dipolo.

En el segundo capítulo se estudiaron las características de la antena a utilizar, el dipolo, del cual vimos la influencia que tenía en la frecuencia de resonancia la variación del tamaño de sus brazos, llegando a la conclusión de que el tamaño que mejor adaptación tenía a la frecuencia deseada de 2GHz era el más cercano a $\lambda/2$ como era de esperar. Posteriormente en el estudio del balun, necesario para el buen funcionamiento del dipolo al alimentarse mediante coaxial, realizamos varios barridos paramétricos para encontrar las dimensiones adecuadas. Estas dimensiones debían ser aquellas para las cuales la señal a la salida de uno de los brazos del balun tuviese 3dB de diferencia y 180° de desfase respecto al otro brazo. Una vez encontrado el diseño óptimo vimos en la Figura 2.21 que el nivel de adaptación seguía siendo el adecuado entorno a -16dB, pero sin embargo la frecuencia de resonancia era alrededor de 100MHz mayor.

En el siguiente capítulo una vez teníamos la antena diseñada, el objetivo era analizar las características de los planos de masa artificiales. En este capítulo empezamos analizando una sola celda de los planos para tres metalizaciones diferentes, en la primera teníamos un solo anillo, y en las otras dos teníamos dos anillos, en uno de ellos de forma concéntrica y en la otro caso estaban uno sobre el otro en diferentes sustratos en una estructura multicapa.

En el primer caso en el que teníamos un solo anillo hicimos varios barridos paramétricos, en los que comprobamos como era de esperar que el anillo cuanto más pequeño era, tenía una frecuencia mayor de trabajo, además vimos cómo el material y grosor utilizados para el sustrato influye enormemente en los resultados tanto de la frecuencia de trabajo como del ancho de banda.

En los dos siguientes casos en los que teníamos dos anillos, obtuvimos resultados muy similares. El objetivo en este caso era comprobar que teníamos dos frecuencias de resonancia debidas cada una de ellas a un anillo diferente. Esto lo vimos al variar el ancho de uno de los anillos, comprobando que solo variaba una de las frecuencias de resonancia, al igual que en el caso anterior cuanto menor era el anillo mayor era la frecuencia de trabajo.

Vistas ya las características de los planos de masa artificiales, en el cuarto capítulo simulamos la influencia que tenía en la adaptación del dipolo los tres planos estudiados. En principio hicimos el estudio con un plano de 5x5 celdas, aunque posteriormente vimos en las distribuciones del campo eléctrico sobre los planos que las celdas que mayor influencia tenían eran las centrales por lo que pudimos reducir el tamaño a 3x3 celdas, quedando un tamaño final del plano de 96x96mm que fue el que finalmente se construyó para hacer las mediciones en el laboratorio.

Durante las simulaciones hicimos variaciones del dipolo, tanto de su longitud como de la altura a la que estaba colocado frente al plano de masa. Como vimos necesitábamos en los tres casos colocar el dipolo a una altura casi siempre mayor a 13mm para conseguir una adaptación buena. Además, el tamaño del dipolo deberá tener un tamaño bastante menor a $\lambda/2$ para conseguir buenos resultados, a diferencia de cuando simulamos el dipolo por separado o junto al balun. En los diagramas de radiación en la mayoría de los casos vimos como el máximo nivel de radiación siempre se producía en la dirección perpendicular a la antena. En las simulaciones de este capítulo se utilizó como antena un dipolo ideal.

Finalmente, el capítulo quinto, correspondiente a los resultados experimentales, teníamos el objetivo de comparar lo obtenido durante todo el proyecto mediante las simulaciones con lo obtenido en las mediciones sobre la antena real. Primeramente se ha procedido a mostrar las especificaciones, tanto a nivel de materiales y tecnologías utilizadas para la fabricación de la antena. Posteriormente para fijar las dimensiones definitivas del dipolo, hemos simulado el dipolo ya con el balun, para ver para qué longitud de los brazos del dipolo y a qué altura debemos colocar el dipolo junto con el balun respecto al plano de masa.

En el caso del plano con un solo anillo comprobamos que las alturas más pequeñas, en concreto $A=2\text{mm}$, son las que mejores resultados obteníamos, además el tamaño óptimo era el que hubiésemos esperado de $\lambda/2$. Al comparar los resultados con los medidos en el laboratorio llegamos a la conclusión de que el plano de masa funcionaba bien, logrando una adaptación buena de la antena, sin embargo aumentaba la frecuencia de resonancia.

Para el caso de dos anillos concéntricos, en la simulación no obtuvimos los resultados esperados, ya que no se conseguía que las dos frecuencias de trabajo consiguiesen estar adaptadas, de todas formas veíamos que los mejores resultados se conseguían para las alturas menores al igual que en el otro caso. Al realizar las mediciones en el laboratorio, comprobamos sin embargo, que el plano sí adaptaba la antena a las dos frecuencias, aunque al igual que ocurría en el anterior caso, estas aumentaban.

Por tanto se pudo demostrar la viabilidad de estos planos, a la hora de conseguir antenas de bajo perfil.

6.2 Posibles líneas futuras

En este apartado se recogen algunas ideas que han ido surgiendo a lo largo de la elaboración del proyecto para nuevas líneas de desarrollo a estudiar en el futuro.

Como hemos visto en diversos estudios anteriores existe una gran variedad de tipos de metalizaciones que podríamos estudiar, y que con la que podemos obtener doble banda de frecuencia. Con lo que utilizando el dipolo y balun ya diseñados en este proyecto, podríamos utilizar otro tipo de metalizaciones. Sin embargo no todas tienen las ventajas de la estructura usada, que además de ser plana es completamente simétrica.

Otro de las variantes y que durante el proyecto pudimos ver su influencia, es el sustrato. A lo largo de los capítulos anteriores realizamos simulaciones con varios tipos de sustrato, pero estábamos supeditados a la disponibilidad en el laboratorio por lo que el resto de simulaciones las tuvimos que hacer en base a eso. Puede por tanto que un sustrato con distinta permitividad o grosor nos de unos resultados mejores o incluso la combinación de dos sustratos en el caso de la estructura multicapa o simplemente utilizar un sustrato diferente para el dipolo y para el plano.

Un punto no cubierto en este proyecto y que durante las mediciones pudimos comprobar ligeramente es la colocación del dipolo respecto al plano de masa. Durante este proyecto siempre lo colocamos en el centro, pudiéndose mover por todo el plano para ver posibles mejoras en la adaptación. En la medida en el laboratorio se vio, que efectivamente el movimiento del dipolo respecto al centro hacía variar la adaptación.

Todo el estudio experimental en radiación es otra de las líneas que quedan por hacer.

Por último, también sería interesante utilizar otro tipo de antenas como antenas de banda ancha o antenas de doble banda, o bien antenas con polarización circular y comprobar que se podrían realizar diseños con este tipo de planos artificiales.

Bibliografía

- [1] Inmaculada Tomeo Reyes, “Aplicación de las superficies de alta impedancia al diseño de antenas de hilo de bajo perfil”, Proyecto final de carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2008
- [2] Eun Young Kim; Ji Hwan Yoon; Young Joong Yoon; Chang Gu Kim, “Low profile dual-band reflector antenna with dual resonant AMC”, Antennas and Propagation (APSURSI), 2011 IEEE International Symposium on , 1800 – 1803, 2011
- [3] X.Mu, W.Jiang, S.X.Gong, and F.W.Wang.,”Dual-band low profile directional antenna with high impedance surface reflector”, Progress in electromagnetic research letters, Vol.25, 67-75, 2011
- [4] Víctor Sánchez Martínez, “Diseño de antenas de hilo de bajo perfil de doble banda basadas en estructuras periódicas de tipo Dogbone”, Proyecto final de carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2010
- [5] Andrea Vallechi, Javier R. De Luis, Filippo Capolino, Franco de Flaviis, “Low profile fully planar folded dipole antenna on a high impedance surface”, IEEE transactions on antennas and propagation, Vol 60, 2012
- [6] Qian, Y.; Deal, W.R.; Kaneda, N.; Itoh, T., “Microstrip-fed quasi-Yagi antenna with broadband characteristics” Electronics Letters Volume: 34, Issue: 23, 2194 – 2196, 1998
- [7] Deepak Patidar, P.K Singhal, Hemant Kumar Gupta, Gulshan Sharma , “ Microstrip Planner Five-element Yagi-Uda Antenna for ISM Band Application “, International Journal of Engineering and Technology, 1, 395-400, 2012
- [8] Sievenpiper, D.; Lijun Zhang; Broas, R.F.J.; Alexopolous, N.G.; Yablonovitch, E., “High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band”, IEEE Trans. Microwave Theory Technologies, Vol 47, No. 11, 2059-2074, 1999.
- [9] Eun Young Kim; Ji Hwan Yoon; Young Joong Yoon; Chang Gu Kim ,” Low profile dual-band reflector antenna with dual resonant AMC”, Antennas and Propagation (APSURSI), 2011 IEEE International Symposium on, 1800-1803, 2011